

平成 26 年度 首都大学東京大学院 理工学系 機械工学専攻

修士学位論文

ツバメの尾翼動作が後流と飛行特性に与える影響

首都大学東京大学院

理工学研究科 機械工学専攻

指導教員：水沼博

学修番号：13883333

氏 名： 畠山 拓

第 1 章 序論

1.1 研究背景	1
1.2 ツバメに関する先行研究	2
1.3 航空力学の知見	6
1.4 研究目的	8

第 2 章 軌道計測実験

2.1 概要と実験装置	9
2.2 データ処理方法	11
2.3 実験結果と考察	16
2.4 誤差と信頼性	29
2.5 まとめ	39

第 3 章 流体解析

3.1 流体解析の理論と条件	40
3.2 定常解析モデルの作成方法と詳細	44
3.3 解析結果と考察	
3.3.1 揚力、抗力、揚抗比について	51
3.3.2 圧力分布、渦度分布、流線について	62
3.4 非定常解析モデルの考察	77
3.5 メッシュサイズの妥当性について	81
3.6 まとめ	83

第 4 章 総論

84

第一章 序論

1.1 研究背景

現代の科学技術の多くは，野生動物の生態が応用されている．航空機はその例の一つで，飛翔する鳥類を参考にした研究が大いに活かされている．そのため今日でも，野生動物の生態を解明することは科学技術の発達に大きく貢献できると言える．

鳥類の一種であるツバメは，他の鳥類と比較して高い飛行性能を有している．高い飛行性能の要因として，体重に対して翼面積が大きいこと，翼の形状が特殊なことなどが挙げられる．⁽¹⁾⁽²⁾ 中でも特徴的なのは，ツバメの尾翼動作と尾翼形状である．ツバメの尾翼は燕尾形状と言われる三日月のような形をしており，尾翼がツバメの後流の流れに影響を与えていることがわかっている．⁽³⁾ Fig. 1.1 にはツバメの仲間であるアマツバメの写真を記す．⁽⁴⁾



Fig. 1.1 飛行中のアマツバメ

1.2 ツバメに関する先行研究

P. Henningsson らの研究では、捕獲したアマツバメ（アマツバメ科，アマツバメ目）を風洞に入れ，風洞内で滑空した際の後流について研究した。⁽³⁾ 一般的に，航空機や鳥類などの翼を有する物体が空気中を飛行する際は，翼端から「翼端渦」という渦を生成することがわかっており，左右の翼端から一つずつ，計二つの翼端渦が発生する。⁽⁵⁾ しかし P. Henningsson らの研究では，アマツバメの後流には四つの渦が発生していることがわかった．渦の発生源は翼端二箇所と，尾翼の先端二箇所だと述べている．渦の様子を Fig. 1.2 に示す．

この研究では，後流の構造に関しては言及しているが，後流の構造が飛行特性に与える影響までは言及していない．また実験は滑空中の静的なもののみで，個体数は 2 匹となっている．

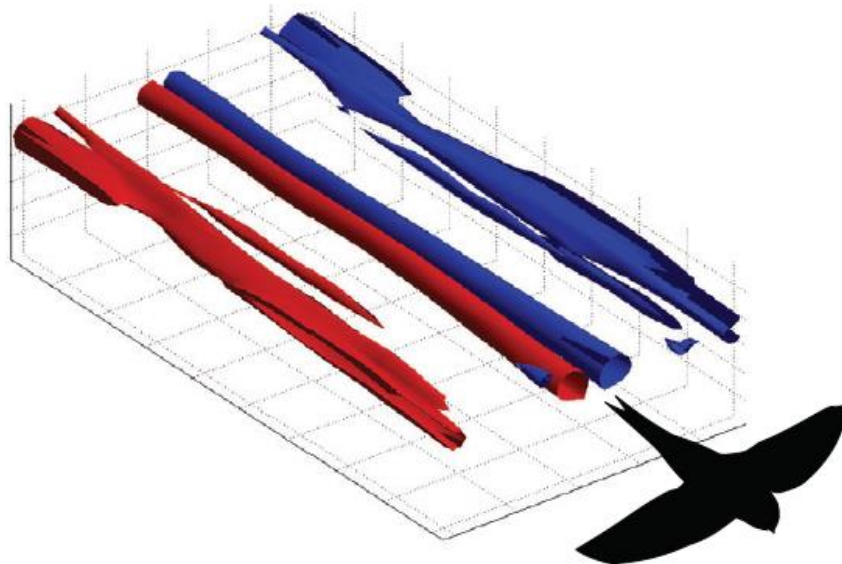


Fig. 1.2 アマツバメ後流の渦

BBC(British Broadcasting Corporation)は、ツバメの飛翔に関する特集を映像として公開した。⁽⁶⁾ その動画中ではツバメの飛翔をスローモーションで確認することができる。動画を静止画に分割し、透過させて一枚の画像にしたのが Fig. 1.3a と Fig. 1.3b である。Fig. 1.3a では、ツバメの尾翼が腹部方向へ折りたたまれていることがわかる。また、Fig. 1.3b では尾翼が大きく展開していることがわかる。これらのことから、ツバメの尾翼形状は常に一定ではなく、状況に応じて角度や開き方が異なっていると言える。この映像は研究機関によるものではないため、「いつ、どんな状況で尾翼が動作するのか」までは言及されていない。



Fig. 1.3a アマツバメの尾翼動作



Fig. 1.3b アマツバメの尾翼動作

Johan Bäckman らの研究では、ツバメをレーダーで追跡してツバメの飛翔軌道を解析した。⁽⁷⁾ その解析の結果を Fig. 1.4 に示す。青い線はツバメの軌道を、赤い線は風向きを表し、A,B,C 3つの個体について軌跡を描いている。風向きと飛翔軌道に焦点を当てた研究だが、飛翔中のツバメの動画や静止画は撮影されていないため、「ツバメがどんな姿勢をした時に、どんな軌道を描くか」は言及されていない。

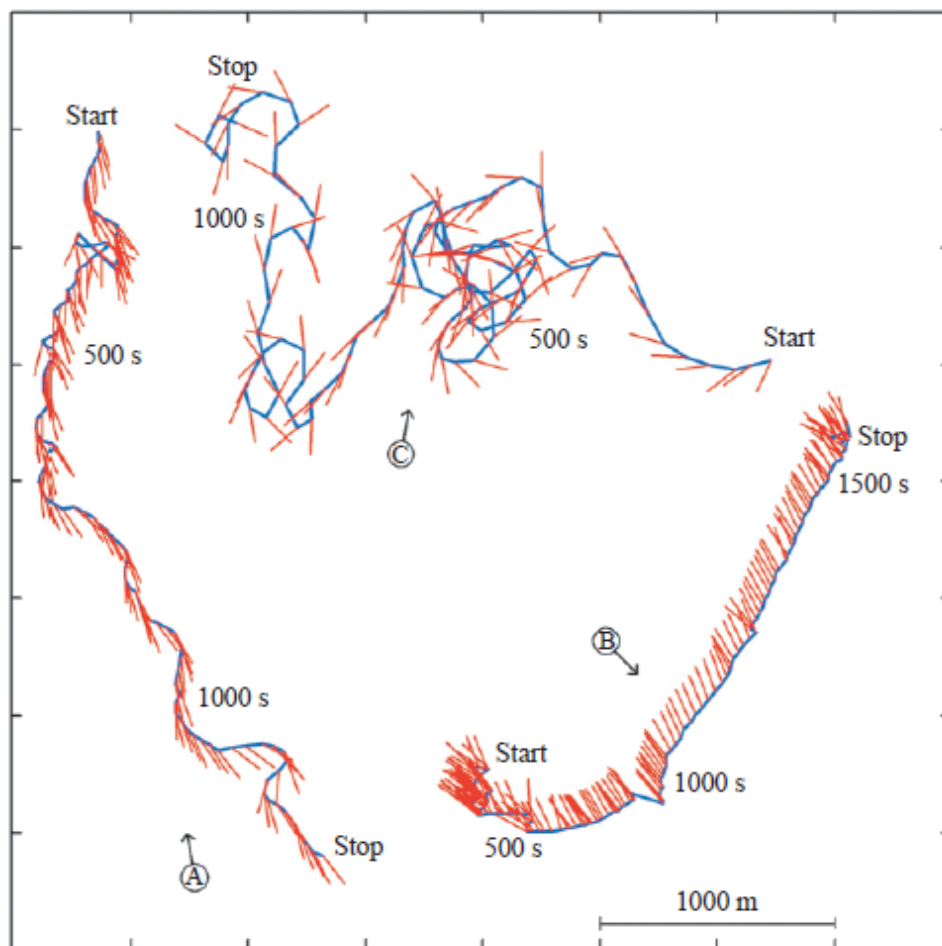


Fig. 1.4 アマツバメの飛行軌道

1.3 航空力学の知見⁽⁸⁾

翼を持つ物体が飛行する時は必ず抗力が発生する。抗力は物体の推進を妨げる向きに働くため、小さいほうが好ましく、飛行特性が良いと言える。抗力を生じさせている原因を分類すると、摩擦抵抗、誘導抵抗、圧力抵抗などがあげられる。特に支配的なのが摩擦抵抗と誘導抵抗であり、抗力の原因の5割は摩擦抵抗が、4割は誘導抵抗が占めると言われている。摩擦抵抗は物体表面における物体と空気間の摩擦により発生する。誘導抗力の原因とされているのは、翼端渦である。航空機でも鳥類でも、翼断面は Fig. 1.5a のように上下に圧力差が生じるような形状をしている。この時、翼を進行方向の始点から見ると、Fig. 1.5b のように翼端の下部から上部へ流れが発生することがわかる。

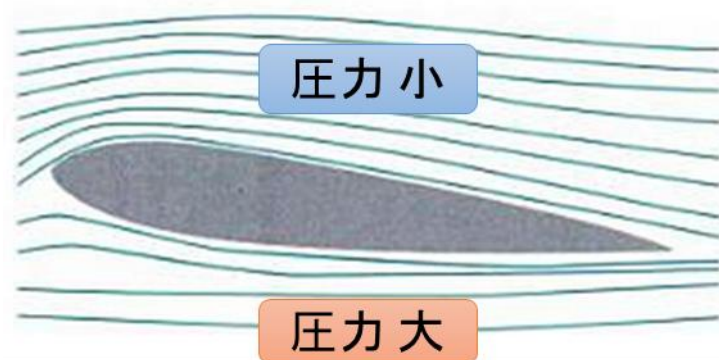


Fig. 1.5a 翼にはたらく圧力

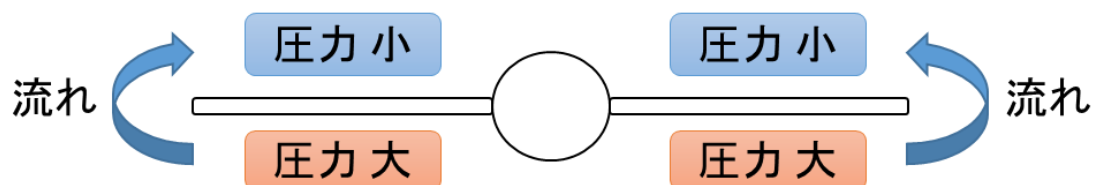


Fig. 1.5b 翼端の圧力差と流れ

この流れが飛行中に連続して発生するため、Fig. 1.6 のように翼は常に渦を引っ張りながら飛行する。翼端渦は翼の後流側で吹おろしとして作用するため、結果として抵抗になる。この抵抗を誘導抗力という。誘導抗力の大きさは翼端渦の強さに依存する。

ツバメの場合、翼端だけでなく尾翼後流にも渦が発生しているが、渦の回転方向などの渦構造に関する詳細はまだ不明瞭なままである。

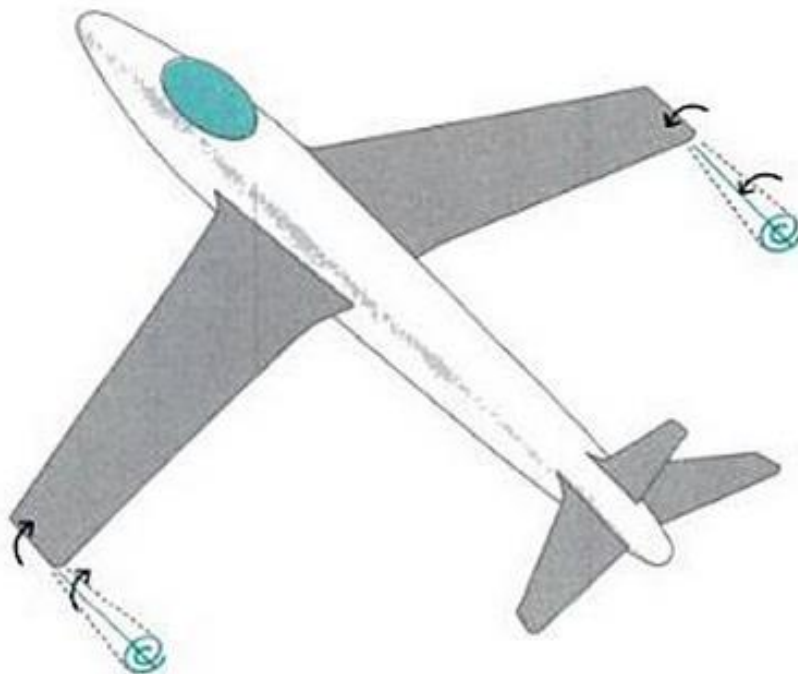


Fig. 1.6 翼端渦の生成

1.4 研究目的

ここまで述べたように、ツバメの尾翼は後流に少なからず影響を与えていることが過去の研究からわかっている。しかし過去の研究では、「尾翼による後流構造の変化が飛行特性に与える影響」については述べられていなく、また「いつ、どんな状況で尾翼が動作するのか」といった尾翼の動作観察については曖昧なままである。そこで本研究では、大きく分けて2つの目的を定めた。

1つ目は、「ツバメの尾翼動作と飛翔軌道の関係性を明らかにすること」とした。例えばツバメをビデオカメラで撮影し、同時にツバメの飛翔軌道を描画することができれば、ツバメの尾翼がどんな動きをした時に、上昇するのか、下降するのか、旋回するのかを明らかにすることができる。ツバメの尾翼動作が後流と飛行特性に与える影響を調べるためには、これらの目的の達成が不可欠であるため、1つ目の目的とした。

2つ目は、「流体解析でツバメ周りの流れを再現し、後流や揚抗力の変化を明らかにすること」とした。いくつかの過去の研究でツバメの飛翔に着目したものがあるが、風洞実験の多くは尾翼の動きを制御することは難しく、尾翼の角度や開き方による後流の違いは不明瞭なままである。従って、モデルの変更や制御が容易な流体解析を用い、過去の研究で明らかにされなかった流れを扱うことにした。

本研究では、1つ目の目的でツバメの姿勢パラメータを分類し、2つ目の目的で各姿勢の定常解析を行った。また尾翼を動作させる非定常計算も行い、尾翼周りの流れの過渡的な変化も取り扱う。

第 2 章 軌道計測実験

2.1 概要と実験装置

軌道計測実験では、角度センサを搭載したビデオカメラでツバメを動画撮影し、角度センサで得られた情報を後処理することでカメラの向きや速度、即ちツバメの飛翔軌道を計測する。Fig. 2.1 に実験装置の概要を示す。カメラの上部には、ドットサイトと角度センサが取り付けられている。ズーム倍率が高い場合、カメラの僅かな動きでツバメが画面外に飛び出してしまうため、ドットサイトを使用して追従性を高めた。角度センサはカメラの角度を 3 軸で計測することができ、データはマイコンを介して PC へと送られる。このデータを後述する方法で処理することで、ツバメの飛翔軌道を計測することができる。次項に実験装置に用いた各種製品の名称と詳細を記す。

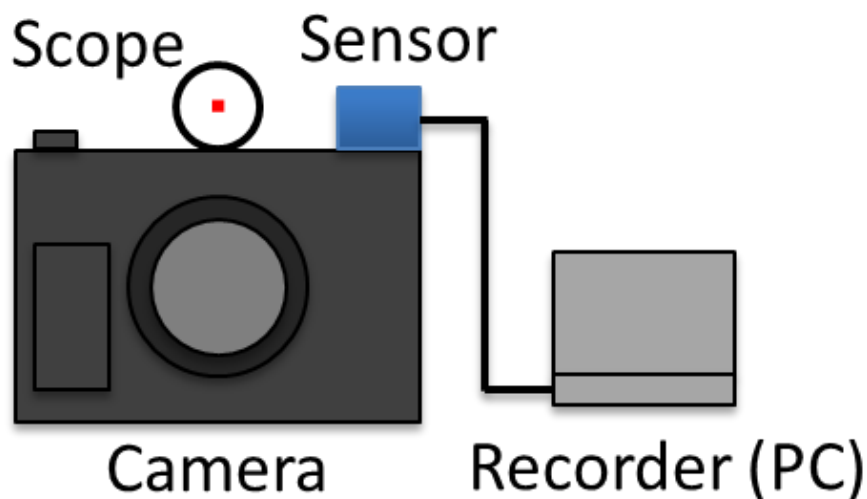


Fig. 2.1 軌道計測実験 装置概略図

【軌道計測実験 -使用機材詳細-】

カメラ: CASIO EF-F1

撮像センサーサイズ 512×384[pix], 7.2×5.3[mm] (1/1.7 型)

最大動画フレームレート 1200[fps]

最大焦点距離 400[mm] (35mm 換算)

マイコン: Arduino MEGA

角度センサ: MPU-6050 (3 軸対応)

誤差 0.001[deg]

ドットサイト(スコープ): STOK ドットサイト

記録装置: 汎用ノート PC

2.2 データ処理方法

この節ではデータの処理方法について述べる． Fig. 2.2 にツバメの位置座標と座標系に関する図を示す． 各値の詳細は以下の通りである．

(X, Y, Z): 空間固定座標系

点 P (x, y, z): ツバメの位置座標 [m]

原点 O (0,0,0): カメラの位置 [m]

r' : カメラとツバメの距離 [m]

θ_x, θ_y : X 軸周りの回転, Y 軸周りの回転 [deg]

(θ_x : カメラが上を向くと正 θ_y : カメラが右を向くと正)

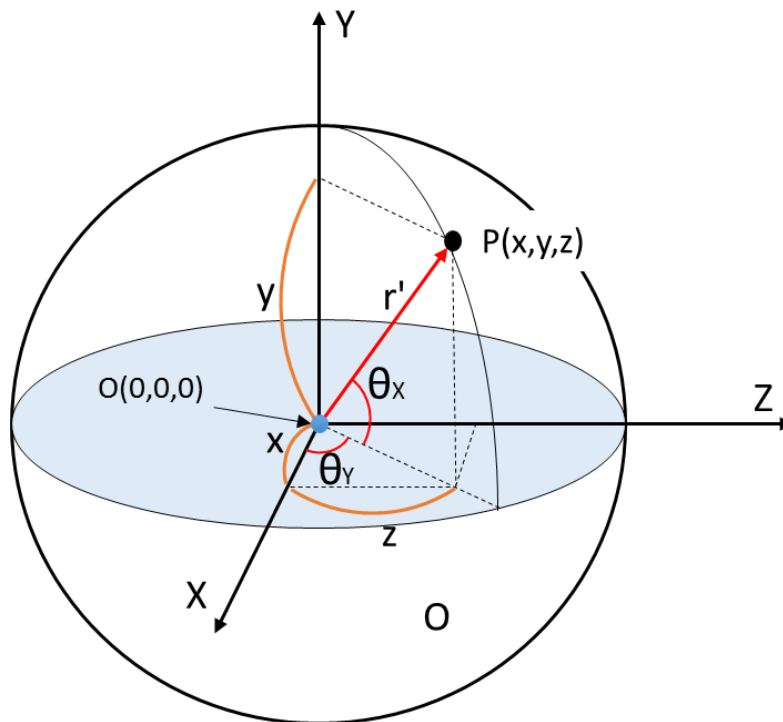


Fig. 2.2 データ処理方法

Fig. 2.2 より, ツバメの位置座標 $P(x, y, z)$ は

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r' \cos \theta_X \cos \theta_Y \\ r' \sin \theta_X \\ r' \cos \theta_X \sin \theta_Y \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

で求めることができる. 従って, ツバメの位置座標を求めるには r' , θ_X , θ_Y , を計測することが必要である. (本来カメラの回転は θ_X , θ_Y に加えてカメラの方向ベクトルを軸とした回転も含まれるが, 撮影中の変位が小さいため無視できるものとした. 第 2.5 節で詳細を述べる.)

θ_X , θ_Y に関しては, 角度センサが各時刻における値を出力するため, データの取得が容易である. カメラとツバメの距離 r' に関しては生データとして出力する装置がないため, 他のデータから算出する必要がある. 本研究では, 画像内のツバメの大きさを計測することで, 距離 r' を算出する方法をとった. r' の算出に関する概要図を Fig. 2.3 に示す. ここで,

r : 焦点距離 (35mm 換算) [mm]

r' : カメラとツバメの距離 [mm]

b' : ツバメの大きさ [mm]

b : カメラのセンサ上に写るツバメの大きさ [mm]

p : カメラのセンサ上に写るツバメの大きさ [pix]

S_{mm} : カメラの撮像センササイズ [mm]

S_{pix} : カメラの撮像センササイズ [pix]

とする.

まず, Fig. 2.3 とカメラの光学的特性から,

$$\frac{b'}{b} = \frac{b'}{\frac{S_{mm}}{S_{pix}} \times p} \quad (2.2)$$

が導かれる.

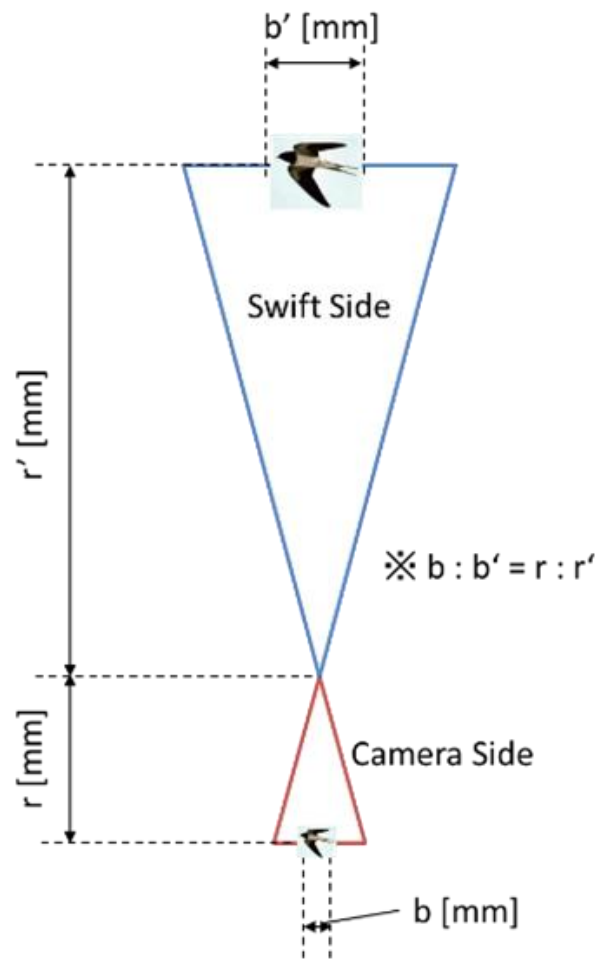


Fig. 2.3 距離 r' の計算

また, $b:b' = r:r'$ より, r' は

$$r' = r \times \frac{b'}{b} = r \frac{b'}{\frac{S_{mm}}{S_{pix}} \times p} \quad (2.3)$$

で計算できる. ここで, 焦点距離 r はズーム倍率から, ツバメ全長 b' は剥製や文献の標準値から定数として与えられる. 従って, 撮影した画像上で, ツバメが何 pix で写っているか ($=p[pix]$) を測定すれば距離 r' がわかり, それに伴い座標 P がわかる.

しかしながら, この計算方法は, カメラが完全にツバメを捉え続けるという仮定の計算であり, ツバメが急な移動をした場合はツバメ座標 P に誤差が生じる. そこで本研究では, 連続する静止画上でツバメがどれだけ移動したかを計算し, 移動量を計算結果に加算することでこの問題に対応した. Fig. 2.4a は, ある撮影の連続する 2 枚の静止画を重ねあわせた写真である. Fig. 2.4a のように画像内でツバメが点 1 から点 2 へ移動した場合は, その移動量を先述の式 (2.1) に足しあわせた. 用いる座標系や基本的な考え方は先の説明と同様であるため, 詳細な計算式は割愛する.



Fig. 2.4a 画像内で移動するツバメ

次に画像中を移動するツバメの位置座標の決定方法について述べる．この処理では画像をグレースケールで二値化し，指定した色範囲をもつ対象を認識し，移動を追跡する．その際，指定した色範囲をもつ対象の，中心地を中心座標として処理する．図のように対象の x 座標範囲が $x1 \sim x2$ だった場合，中心 x 座標は $(x1+x2)/2$ として処理する．y 座標についても同様である．(Fig. 2.4b 参照)

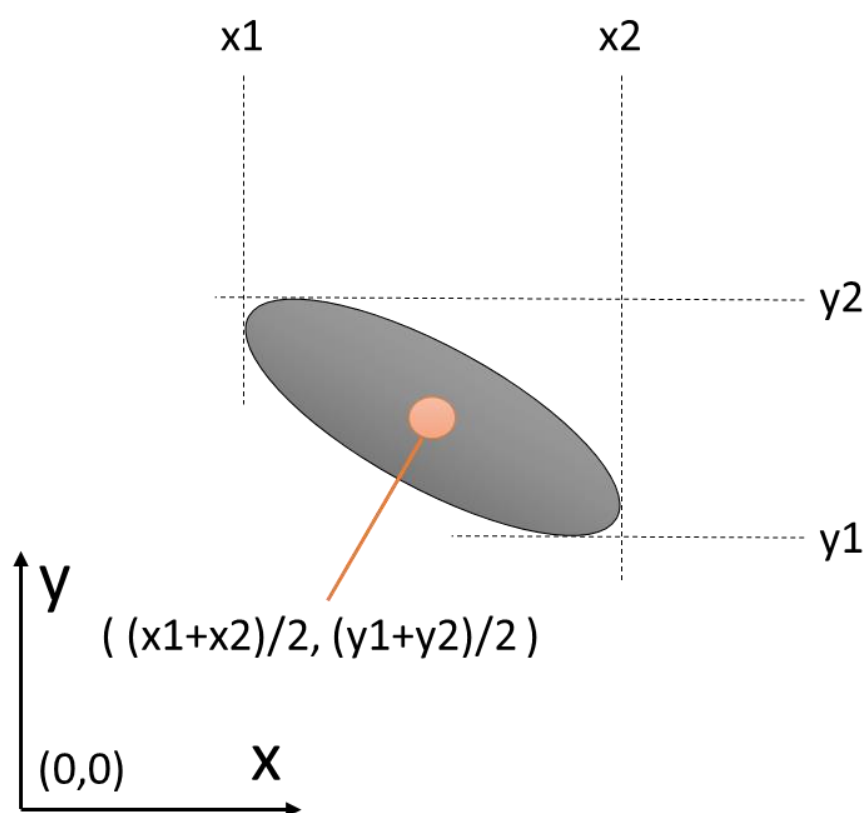


Fig. 2.4b 画像内のツバメの位置座標

2.3 実験結果と考察

2014 年 8 月に撮影を行い，複数の動画を入手した．本論ではその中でも計測に適した 2 つの動画について取り扱い，以後撮影 A，撮影 B と称する．

まず，撮影 A の計測結果を記す．Fig.2.5a と Fig. 2.6a はそれぞれ撮影 A の XZ 平面軌道と ZY 平面軌道を表す．カメラ位置からみて，x 軸は左右方向，y 軸は上下方向，z 軸は奥行方向を表す．それぞれの図について，計算値をそのままプロットした補正前のデータと，移動平均で補正したデータを記載している．

Fig. 2.7a と Fig. 2.8a は撮影 A の三次元軌道を表す．いずれも移動平均処理後のデータを使用している．上下方向の動きをより特徴づけるために，x(左右方向)と z(奥行方向)は同等のスケールを持つが，y(上下方向)はスケールが異なることに留意されたい．

また各図について，ツバメは START と記載した点に位置する瞬間から撮影を開始し，STOP と記載した点まで撮影を継続した．更に軌道を特定の区間で分け，それぞれに番号を記載した．

Table. 2a は撮影 A の各区間におけるツバメの速度を表し，Fig. 2.9a は座標②の瞬間の前後の姿勢の様子を表す．

なお，補正に関する詳細や，軌道が有する誤差については第 2.5 節で述べる．

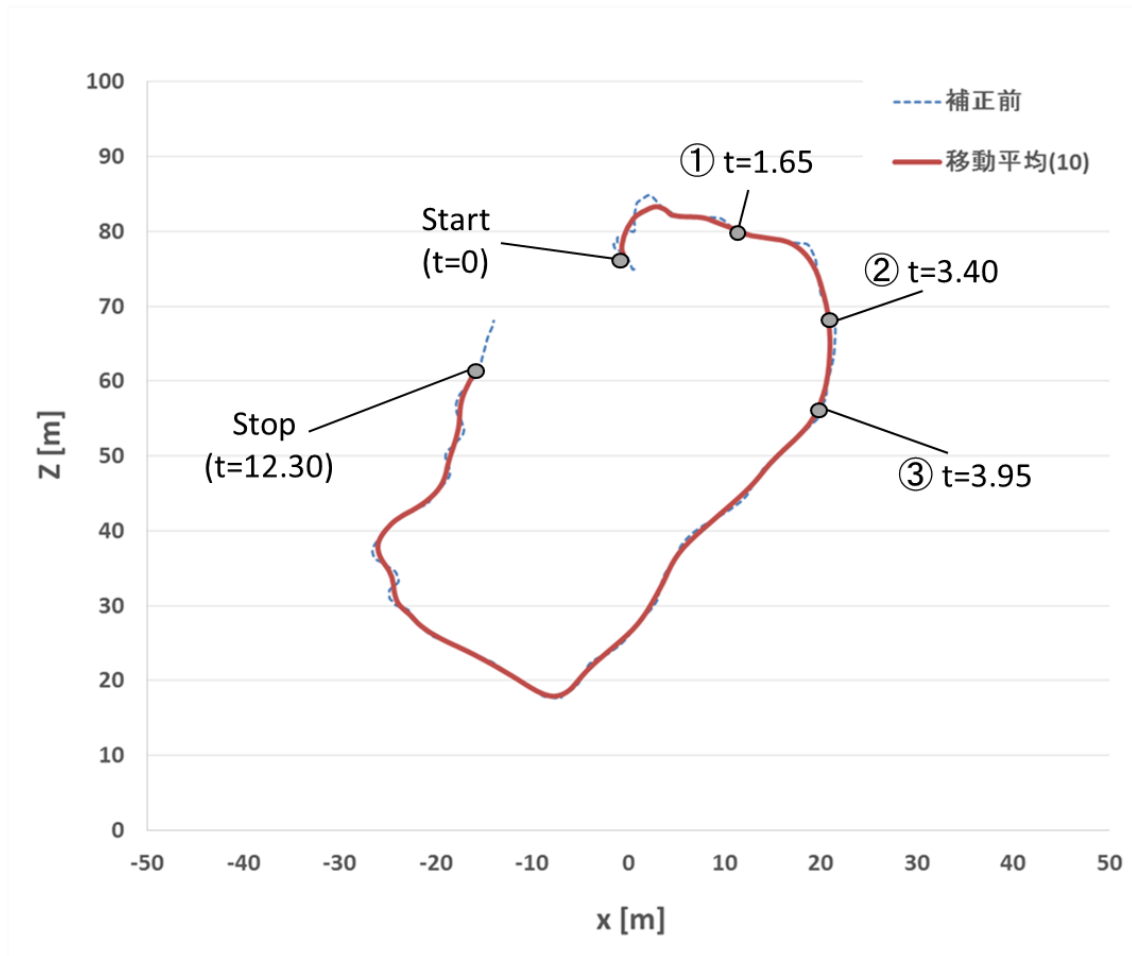


Fig. 2.5a XZ 平面軌道 撮影 A

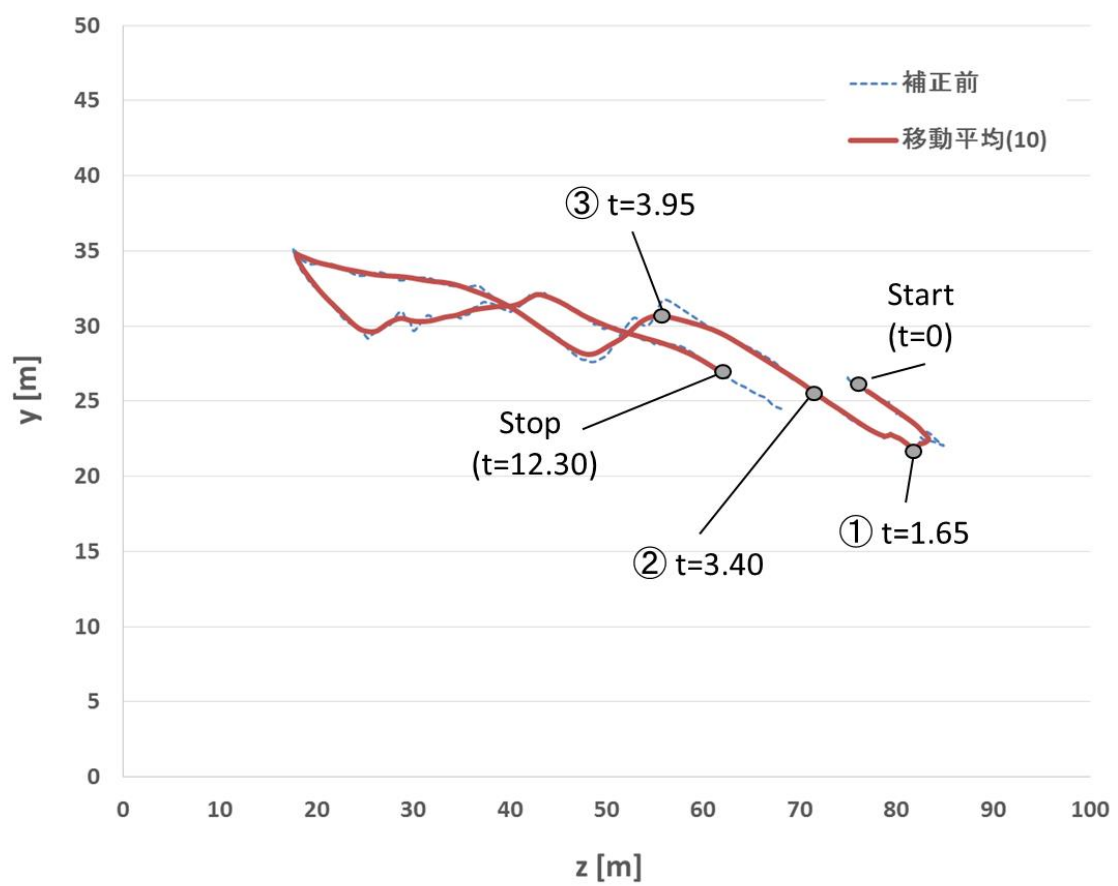


Fig. 2.6a ZY 平面軌道 撮影 A

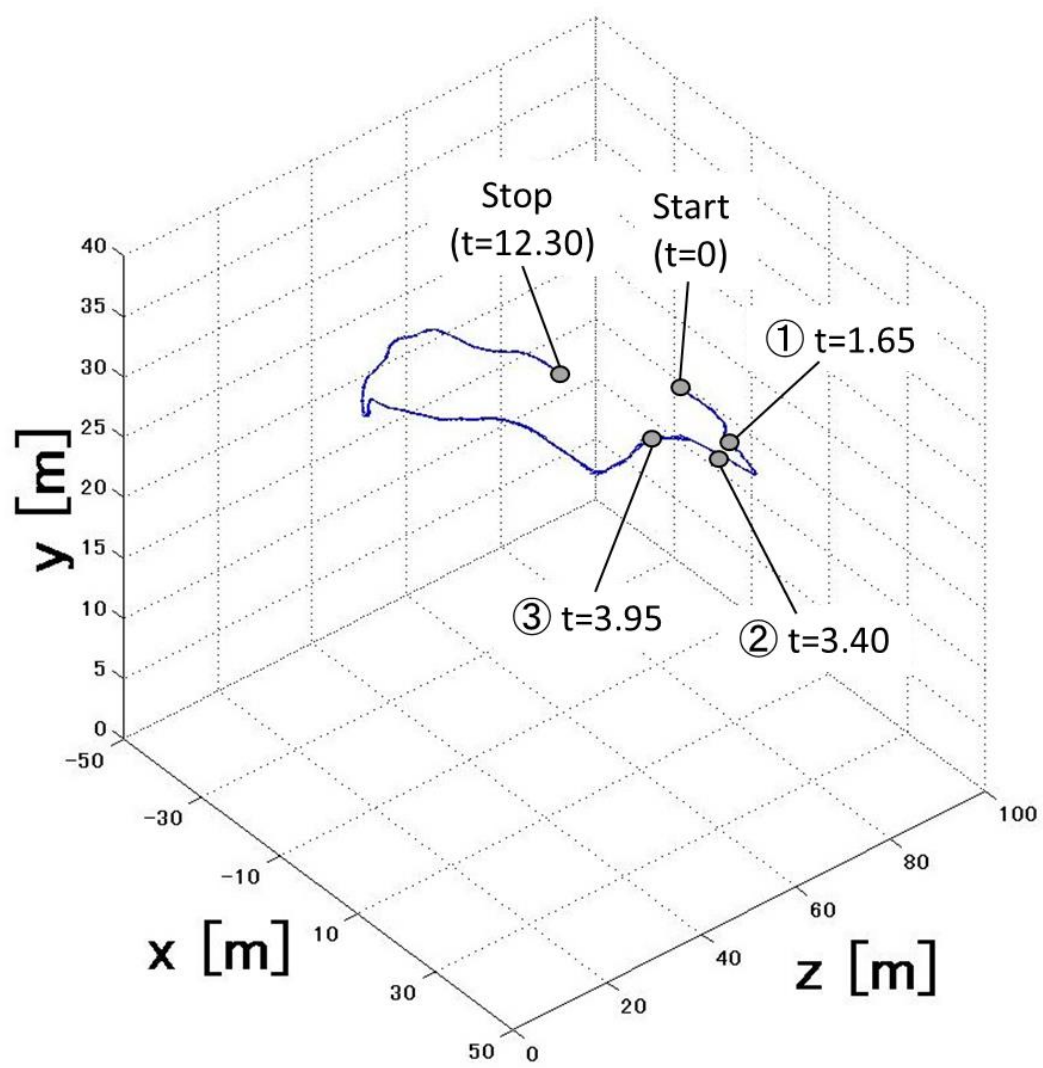


Fig. 2.7a 3次元軌道 撮影 A

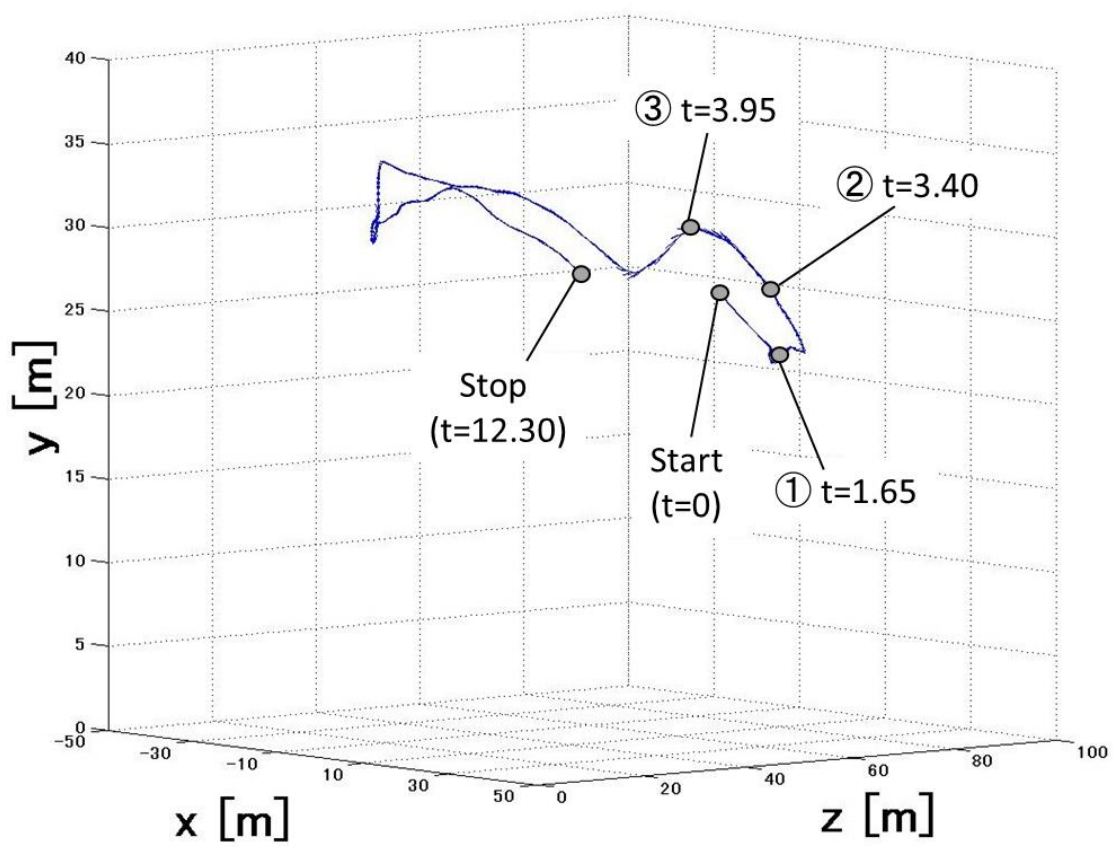


Fig. 2.8a 3次元軌道 撮影 A (別視点)

Table 2a 各区間のツバメの速度 撮影 A

区間	経過時間 [s]	平均速度 [m/s]	上昇速度 [m/s]
① - ②	1.75	13.34	3.07
② - ③	0.55	26.56	8.70



Fig. 2.9a 撮影 A 座標② (t=3.40)の前後の姿勢

まず Table 2a をみると、区間①-②よりも区間②-③のほうが、平均速度、上昇速度ともに大きいことがわかる。また、Fig. 2.6a などを見ると、座標②を過ぎた次の瞬間からツバメは急上昇し、座標③にかけて高度を約 5m 上げていることがわかる。Fig. 2.9a で座標②の前後の姿勢をみると、ツバメが尾翼を広げていることがわかる。これらの結果から、ツバメが尾翼を広げた時は、速度の増加を伴って急上昇する可能性があると言える。

同様の処理を行った撮影 B に関する計測結果を Fig 2.5b ~ Fig 2.9b, Table 2b に記す.

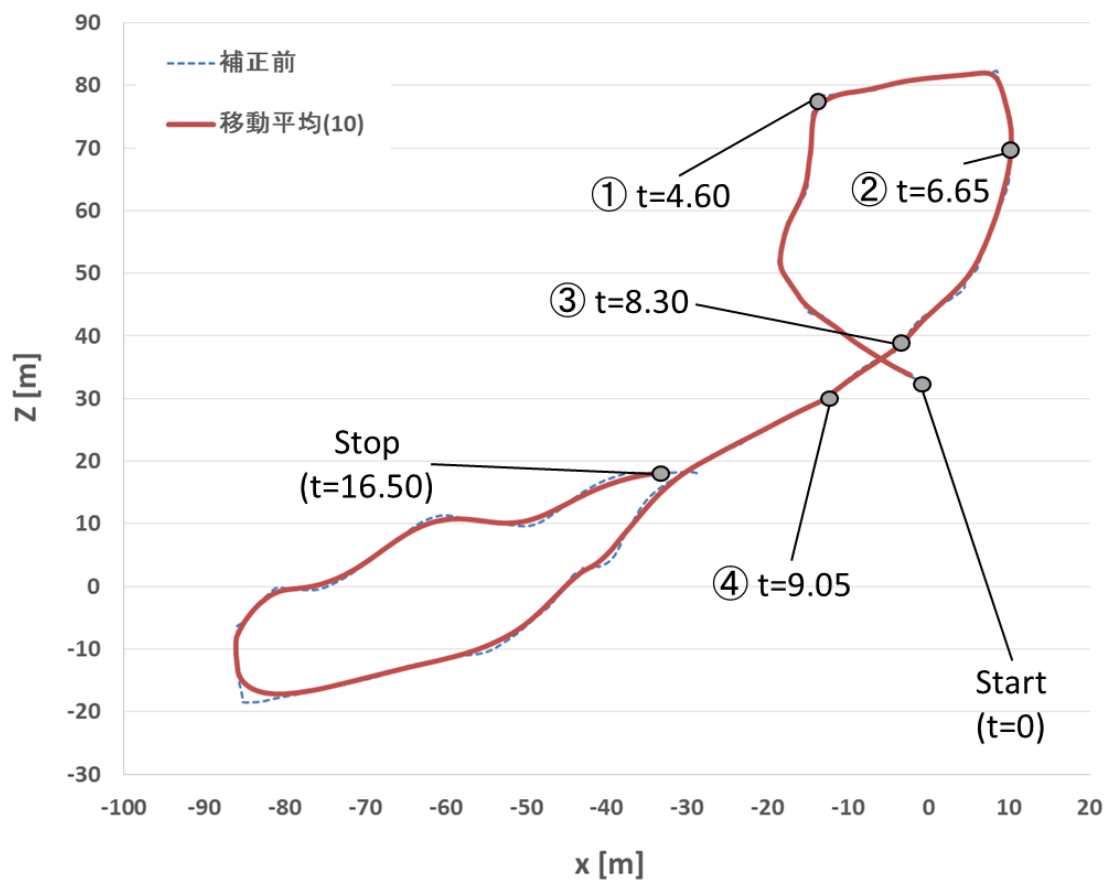


Fig. 2.5b XZ 平面軌道 撮影 B

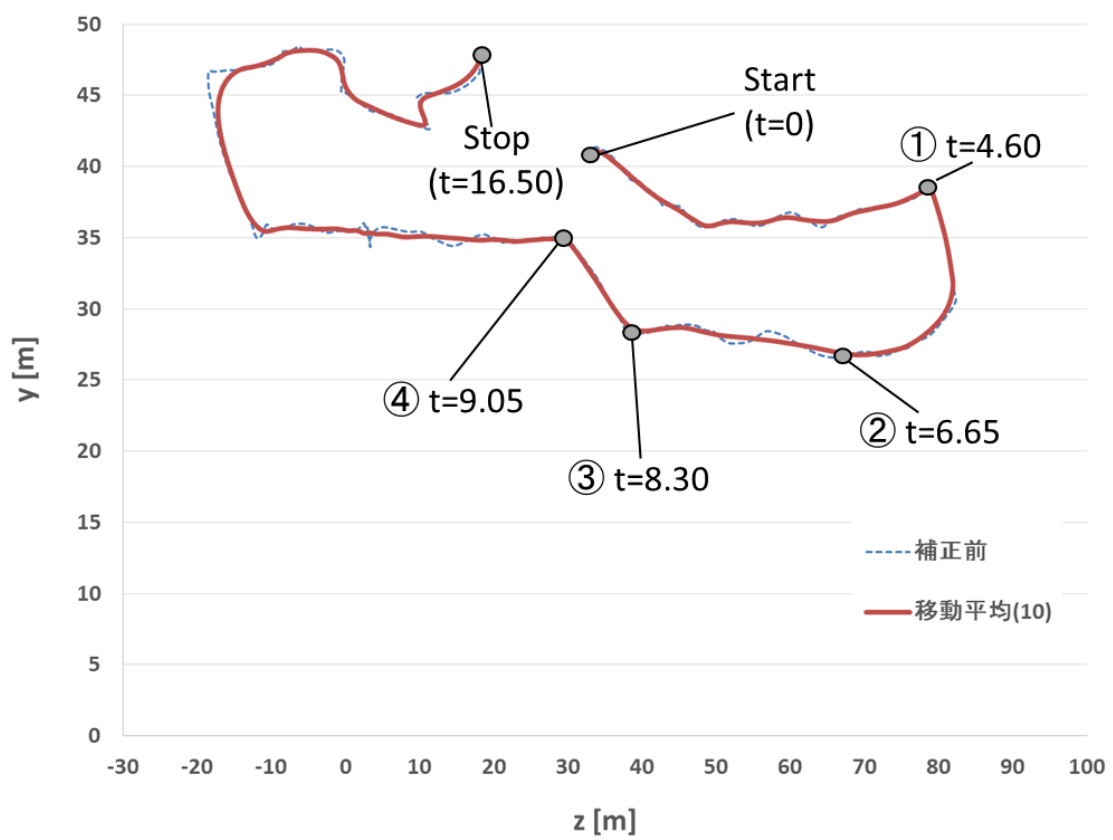


Fig. 2.6b ZY 平面軌道 撮影 B

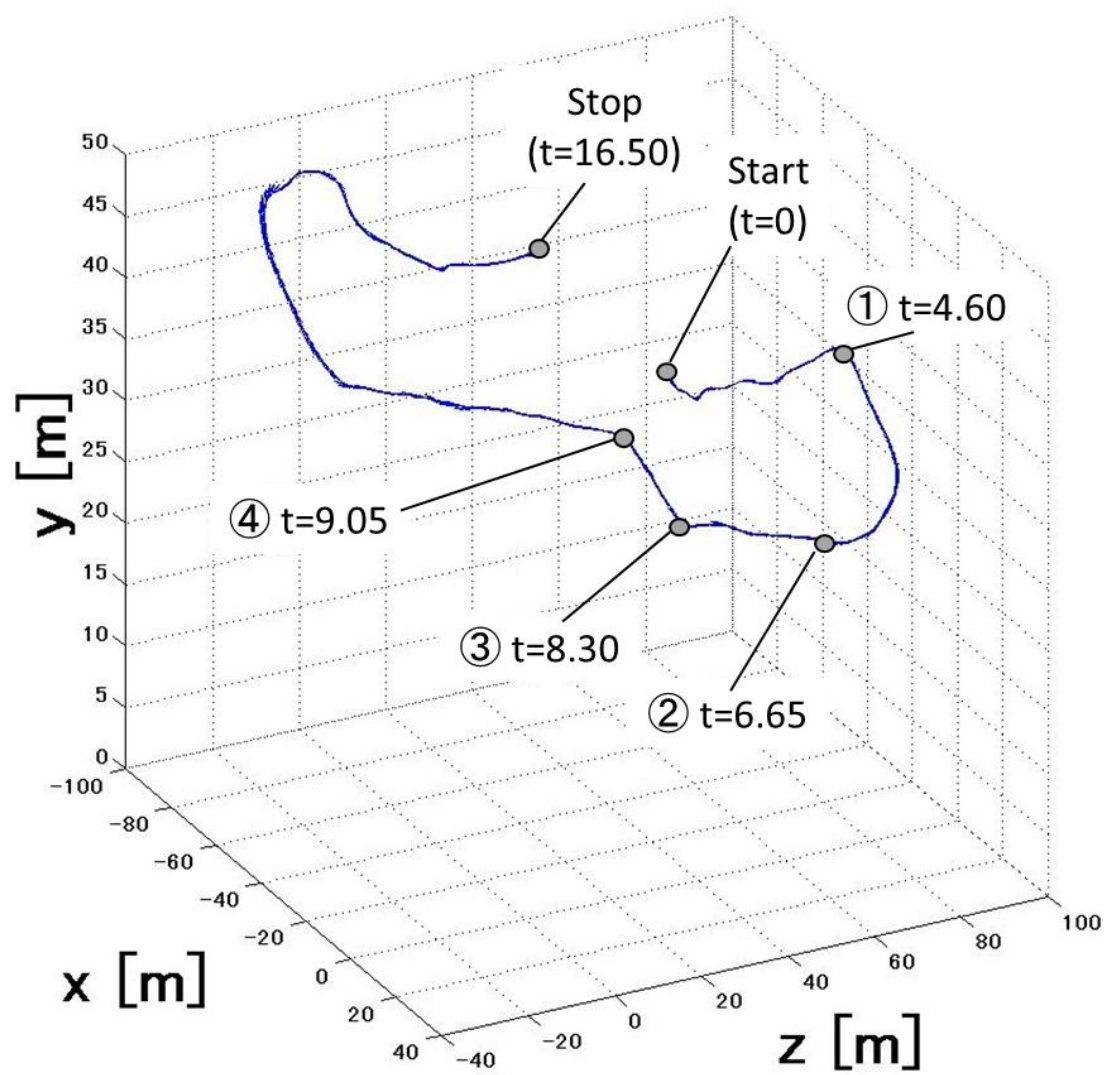


Fig. 2.7b 3次元軌道 撮影 B

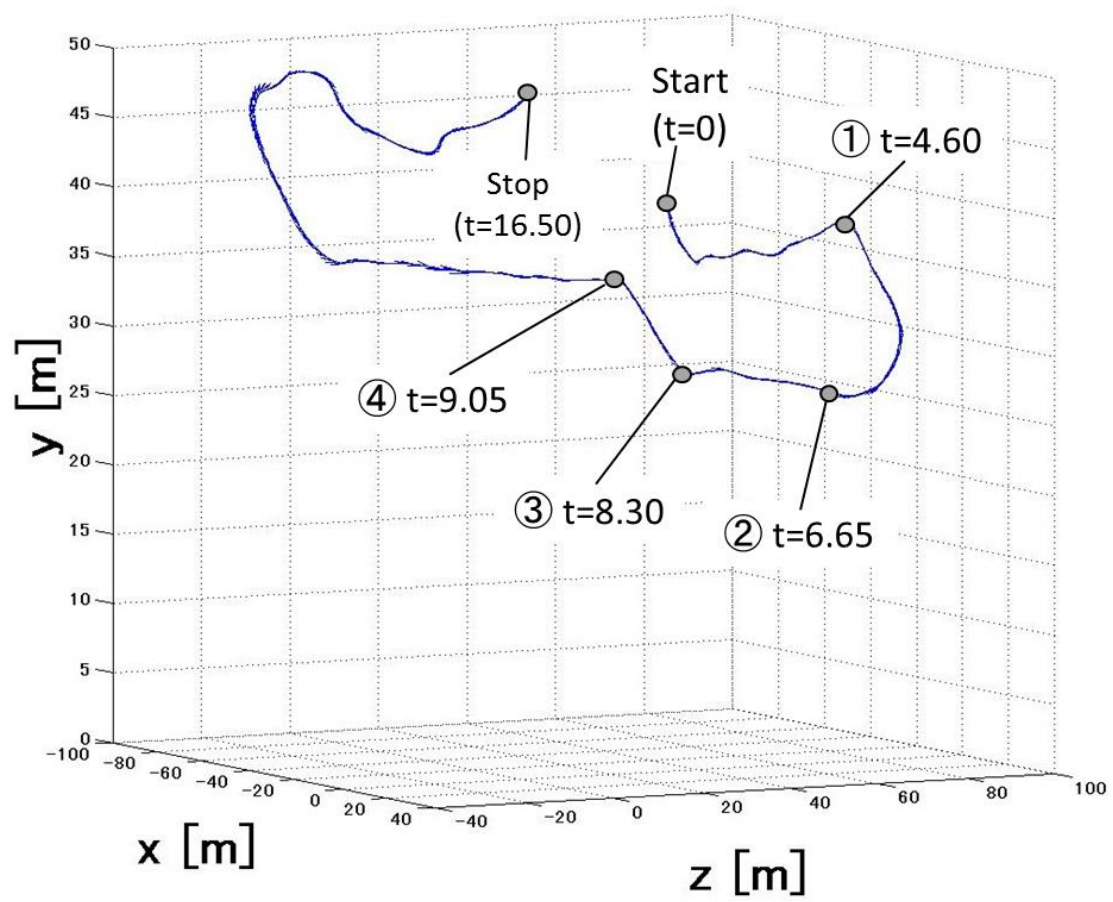


Fig. 2.8b 3次元軌道 撮影 B (別視点)

Table 2b 各区間のツバメの速度 撮影 B

区間	経過時間 [s]	平均速度 [m/s]	上昇速度 [m/s]
① - ②	2.05	16.20	-5.58
② - ③	1.65	22.13	1.60
③ - ④	0.75	18.02	7.34



Fig. 2.9b 撮影 B 座標③ (t=8.30)の前後の姿勢

まず Table 2b をみると、区間②-③よりも区間③-④のほうが、上昇速度が大きい。また、Fig. 2.6b などを見ると、座標③を過ぎた次の瞬間からツバメは急上昇し、座標④にかけて高度を約 7.5m 上げている事がわかる。Fig. 2.9b で座標③の前後の姿勢をみると、ツバメが尾翼を広げていることがわかる。これらの傾向は撮影 A の傾向と類似しており、尾翼の動作が軌道に影響を与えている可能性は大いにあるといえる。

2.4 誤差と信頼性

第 2 章で述べてきた軌道計測実験が有する誤差と信頼性について述べる。第 2.2 節で述べたように、ツバメの座標 $P(x, y, z)$ は

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r' \cos \theta_X \cos \theta_Y \\ r' \sin \theta_X \\ r' \cos \theta_X \sin \theta_Y \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

で求められる。本来は更に各座標に画面内移動量が加算されるが、その移動量の平均値は(2.1)式の値の 1~2 割程度であるため、ここでは画面内移動量の誤差は小さいと判断して無視する。ツバメの x 座標について取り上げると、(2.1)式と(2.3)を組み合わせると

$$x = r \frac{b'}{\frac{S_{mm}}{S_{pix}} p} \cos \theta_X \cos \theta_Y \quad (2.4)$$

が導かれる。ここで、次項に各値が有する誤差を記載する。

焦点距離: $r = 84.03$ [mm]

→ズーム倍率と撮像センササイズより計算. 有効数字以外の誤差は持たない.

ツバメの実際の大きさ: $b' = 135 \pm 15$ [mm]

→剥製の大きさ 135mm を基準とし, 個体差を ± 15 mm と仮定した.

なお, 大きさはツバメの全長 (頭部先端から尾翼先端) とした.

カメラのセンサ上に写るツバメの大きさ: $p = 14 \pm 1$ [pix]

→撮影 A の平均値である 14pix を基準とし, 測定誤差を ± 1 pix と仮定した.

カメラの撮像センササイズ: $S_{mm} = 7.2 \times 5.3$ [mm]

カメラの撮像センササイズ: $S_{pix} : 512 \times 384$ [pix]

→カメラのスペックシートより.

角速度センサの出力値: $d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z = \pm 0.01$ [deg]

→角度センサのスペックシートより.

誤差を有するが, $\cos 0.01 \doteq 1$, $\sin 0.01 \doteq 0$ とみなし, 誤差を無視する.

誤差を有する値を式(2.4)に代入すると,

$$x = r \frac{b' \pm 15}{\frac{S_{mm}}{S_{pix}} (p \pm 1)} \cos \theta_x \cos \theta_y \quad (2.5)$$

が導かれる.

更に(2.5)式を変形すると

$$x = r \frac{b'(1 \pm \frac{15}{b'})}{\frac{S_{mm}}{S_{pix}} p(1 \pm \frac{1}{p})} \cos \theta_x \cos \theta_y \quad (2.6)$$

誤差を含まない値を定数 A として扱うと,

$$x = \frac{1 \pm \frac{15}{b'}}{1 \pm \frac{1}{p}} A \quad (2.7)$$

基準値を代入すると, x の最大値 x_{\max} と, 最小値 x_{\min} は

$$x_{\max} = 1.20A$$

$$x_{\min} = 0.83A$$

となり, x は $\pm 20\%$ 前後の誤差を有する. y, z に関しても同様の誤差を有する. 式からもわかるように, この解析方法誤差の多くはツバメとカメラの距離 r' に依存する. 従ってツバメとカメラの距離 r' が一定であるときは, 誤差も小さくなる. その場合, 誤差はツバメの実際の大きさ b' に依存し, 11%程度の誤差におさまる.

次に、 $p[\text{pix}]$ の計測方法について述べる。ツバメの大きさはツバメの頭部先端から尾翼先端までの長さを測定した。しかし、ツバメがカメラの向きベクトルと垂直方向を向いている場合は全長が正確に測定できるが、斜め方向を向いている場合は全長が短くなってしまう（Fig. 2.10 参照）。そこでこの計測では、Fig. 2.11 のように、ツバメが旋回している時は一定間隔で大きさが変化したと仮定して補完した。

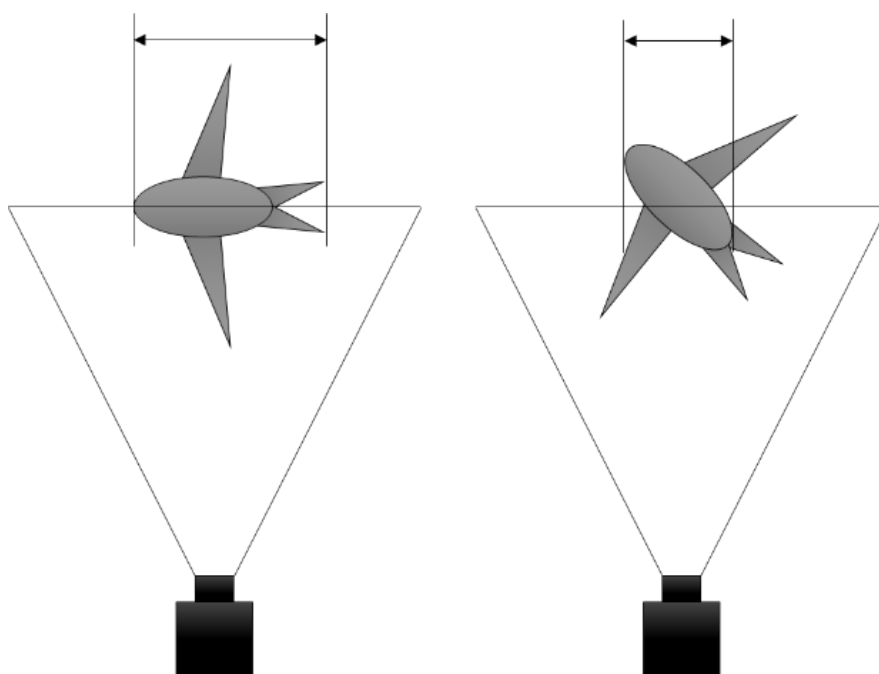


Fig. 2.10 ツバメの向きと全長の変化

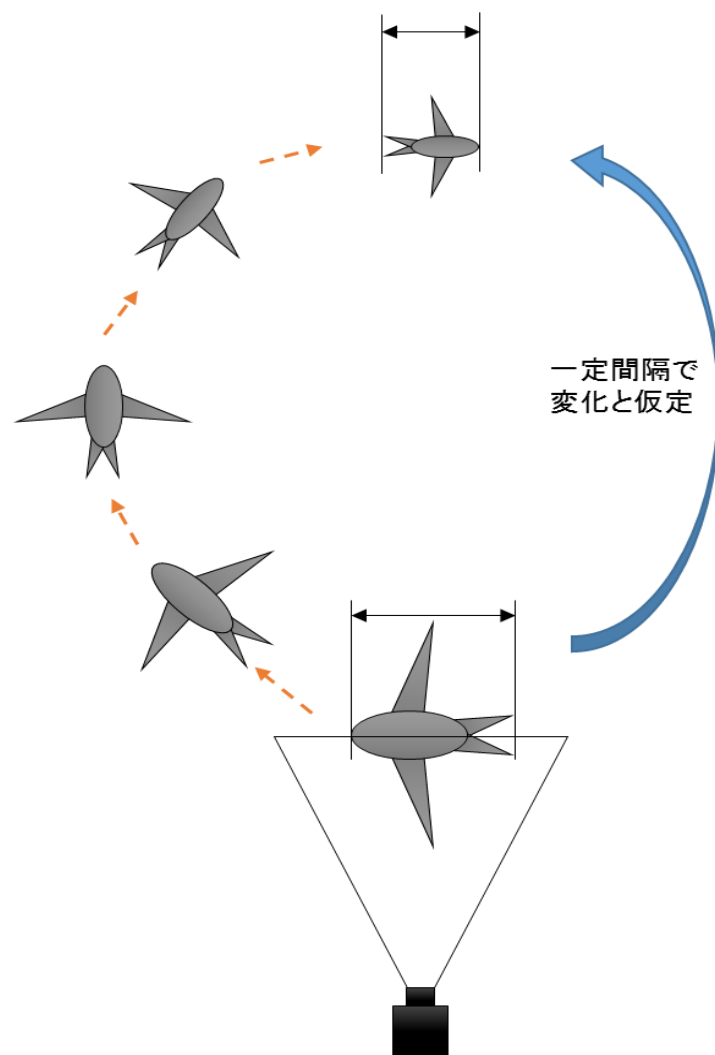


Fig. 2.11 ツバメの全長の補完

次に、この計測実験の信頼性テストとして行った振り子実験について述べる。振り子の往復運動の軌跡は、振り子の長さを持ち上げる高さがわかれば計算できる。そこで、振り子をツバメに見立て、先述の計算方法で軌跡が描けているかを検証した。実験の概要図を Fig. 2.12 に示す。この実験では振り子を X 軸と平行に動かしたため、距離 r' はほぼ一定とみなす。

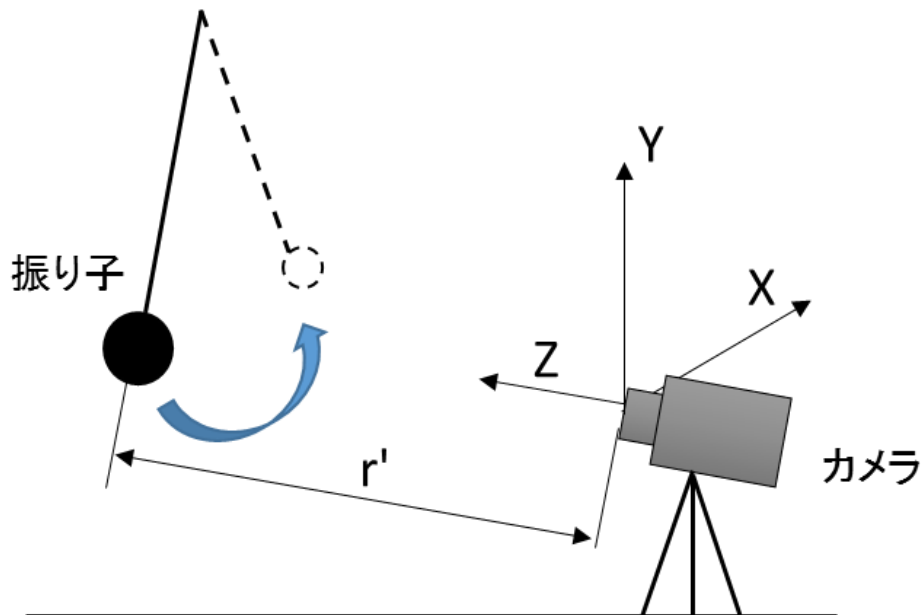


Fig. 2.12 振り子の軌道解析実験 概要図

Fig. 2.13 に軌跡を描いたグラフを示す。横軸は x 座標, 縦軸は y 座標を表し, real は振り子の長さから幾何学的に計算された軌跡, cal は本研究の計測方法で描いた軌跡を表す。Fig. 2.13 を見ると, cal の軌跡は real の軌跡と概ね一致しており, 最大誤差は y 方向に約 0.2m で, 振り子の振れ幅=3.5[m] を基準に考えると 5.7%の誤差になった。

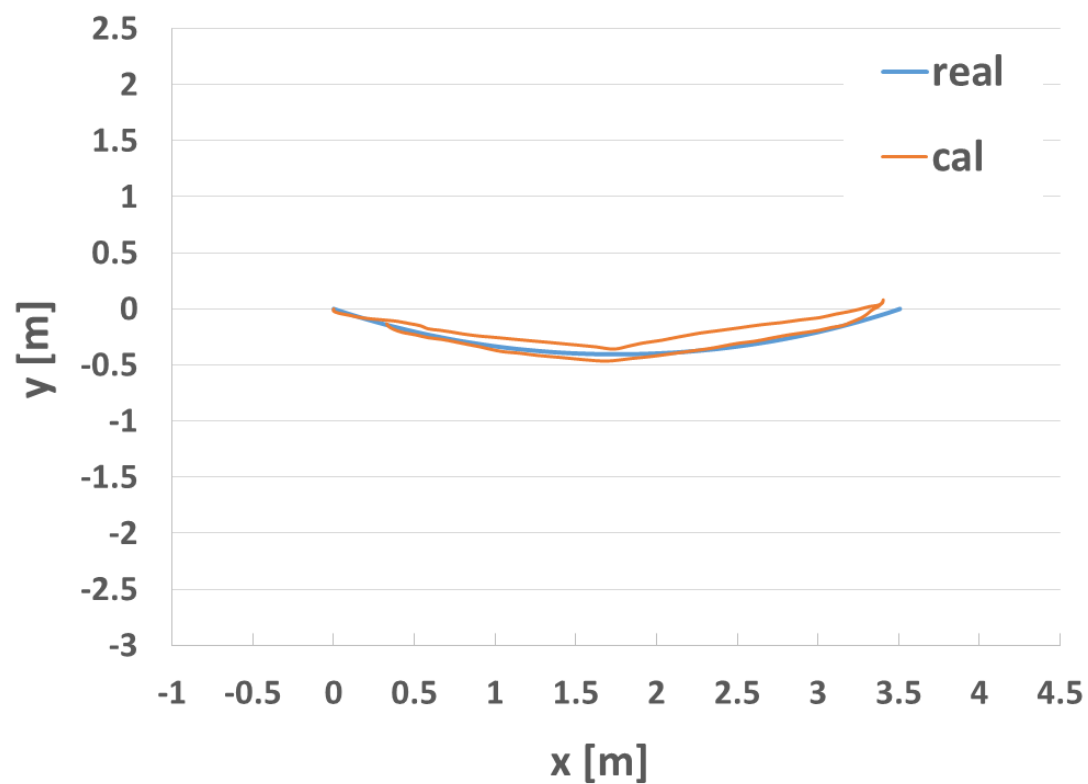


Fig. 2.13 振り子の軌道解析 (x: 左右方向, y: 上下方向)

次に, r' のベクトル軸周りの回転 θ_z [deg] について述べる. Fig. 2.14a は撮影 A のデータであり, 横軸は時間を, 縦軸は角度を表すし, θ_x , θ_y , θ_z はそれぞれの軸周りの角度を表す. 説明のため, $t=0$ [s] における初期値を 0 [deg] としている. Fig. 2.14a をみると, θ_z の変位は他の二つに比べて小さいことがわかる. 最大値で比較すると, $\theta_{z\max}$ は $\theta_{x\max}$ の 12% 程度, $\theta_{y\max}$ の約 9% 程度である. また, 撮影 B における同種のデータを Fig. 2.14b に示す. こちらも $\theta_{z\max}$ は $\theta_{x\max}$ の 9% 程度, $\theta_{y\max}$ の約 3% 程度である. これらのように, θ_z は他 2 つの回転に対して変化量が小さいため, 本計測では微小として無視した.

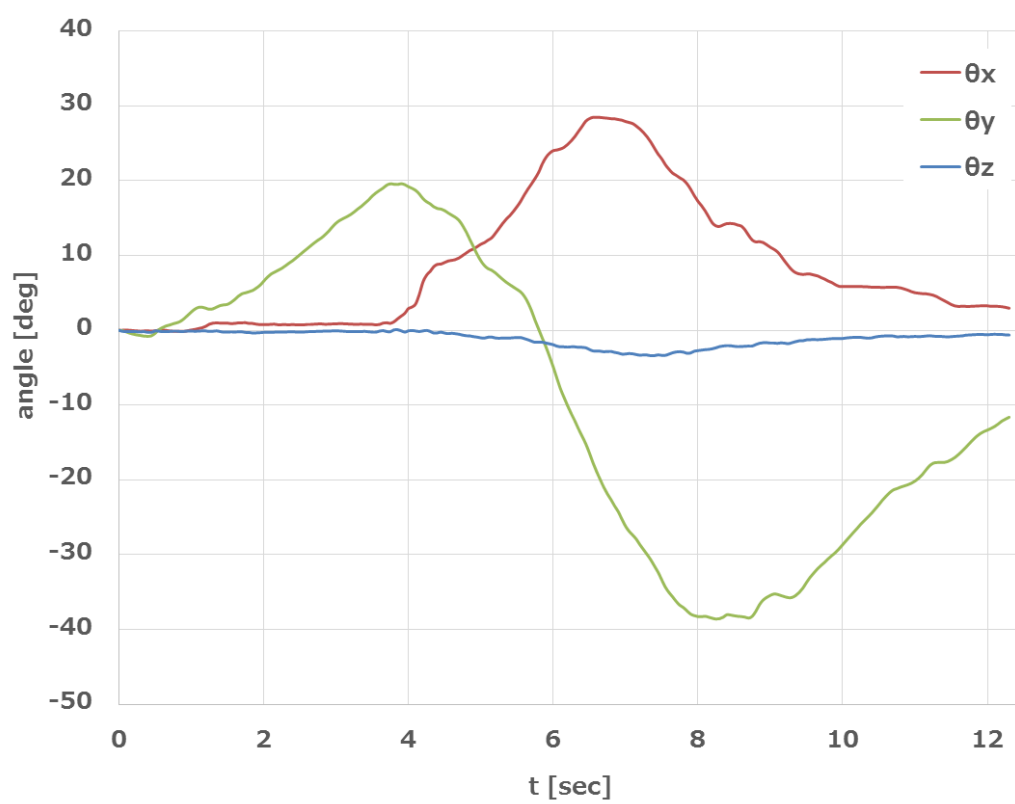


Fig. 2.14a $d\theta$ の変化 (撮影 A)

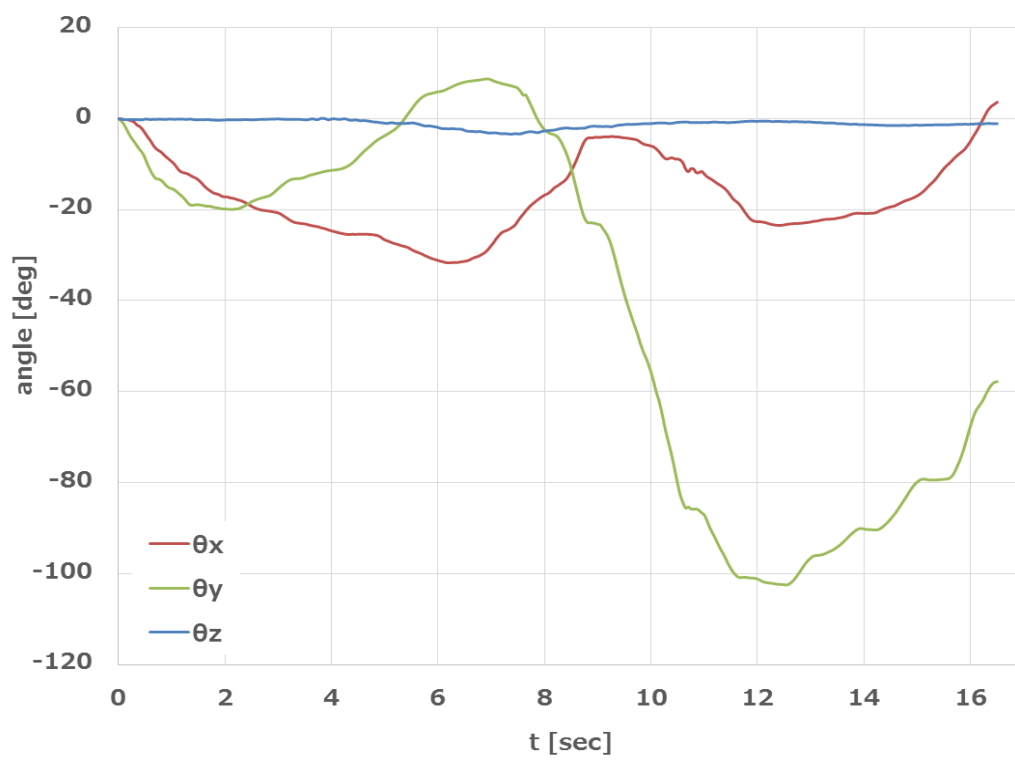


Fig. 2.14b $d\theta$ の変化 (撮影 B)

2.6 まとめ

- ・カメラに角度センサを取り付けてツバメを撮影し，軌道を計測することができた．

- ・軌道を特定の区間で区切り，区間ごとの上昇速度を計算した．また，急激な上昇があった瞬間の静止画を切り出した．ツバメの急激な上昇は，多くの場合尾翼の展開や折り曲げといった動作が伴うことがわかった．

- ・軌道解析が有する誤差は， x , y , z の各座標について最大で $\pm 20\%$ 程度である．ただし，カメラとツバメの距離 r' が変位しない場合は， $\pm 11\%$ 程度におさまる．

第 3 章 流体解析

3.1 流体解析の理論と条件

本研究では流体解析ソフトとして LS-Dyna を使用した。下記に使用したソルバーの支配方程式やメッシュ生成のアルゴリズムを記す。この解析では LS-Dyna971 R7 の非圧縮性流体解析機能(ICFD: Incompressible Fluid Dynamics)を使用した。ICFD の詳細を下記に記す。

支配方程式: ナビエ・ストークス方程式

計算手法: 有限要素法

時間発展の取り扱い: 陰解法

メッシュタイプ: テトラ要素

ICFD 解析ではまず、Fig. 3.1 のように解析対象のモデルと空間領域を作成する。この時、解析対象と流入面、流出面、その他壁面はそれぞれ別々の PART として区別して作成する。

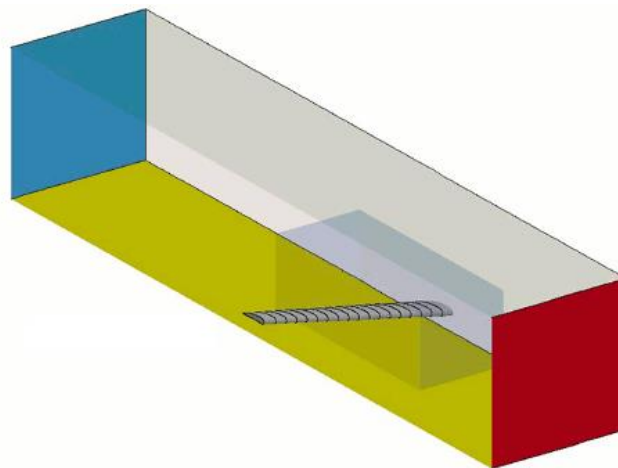
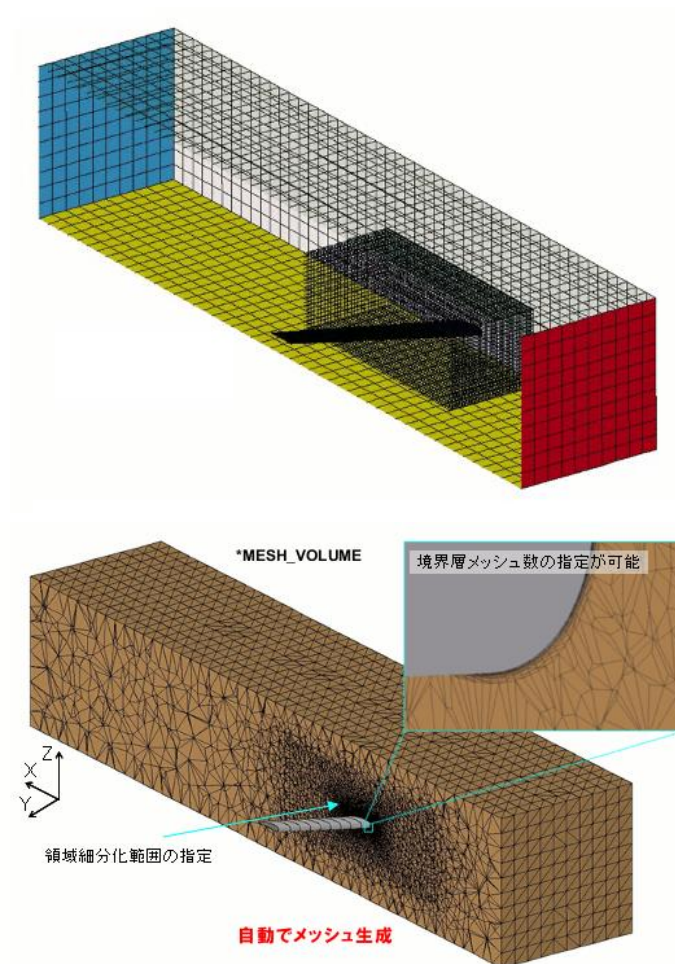


Fig. 3.1 モデル作成イメージ
(株式会社 JSOL 公式 HP より引用)

次に、Fig. 3.2 のように各 PART 表面に要素を作成する。その後、物性値や境界条件を与え解析を開始すると、LS-Dyna が独自のアルゴリズムで流体領域テトラメッシュを生成する (Fig. 3.3 参照)。この際、解析対象の境界層メッシュを生成することができ、境界層の厚み指定も可能である。メッシュ生成のアルゴリズムの詳細はユーザーには公開されていないが、各 PART のメッシュ精度が解析に適していない場合は、エラーメッセージでその旨を表示する仕組みになっている。



上図: Fig. 3.2 PART 作成イメージ

下図: Fig. 3.3 メッシュ作成イメージ
(株式会社 JSOL 公式 HP より引用)

Fig. 3.4 に境界条件の与え方に関する図を記す．ここでは例として 2 次元円柱周りの流れ解析をとりあげる．

PART は LS-Dyna におけるパーツのようなものであり，ユーザーは各 PART に境界条件などを与えることができる．本解析では，PART1 を解析対象（＝円柱），PART2 と PART3 をそれぞれ流入面と流出面，PART4 をその他壁面と設定した．PART2 の流入面から PART3 の流出面に向かって一様流を与えたい場合，まず PART2 に流れ方向の速度境界条件を与える．次に，PART3 には圧力 0[Pa] の圧力境界条件を与える．これらの公開条件は，いずれも時刻 t によらず一定のとした．また，PART1 の解析対象には摩擦有りの条件を，PART4 の壁面には摩擦無しの条件を与えた．更に PART1 についてデータのアウトプット指定を行い，揚力や抗力を時間軸について出力させた．3 次元モデル（＝ツバメ）でも同種の境界条件を与え，ツバメ周りの流体解析を行った．

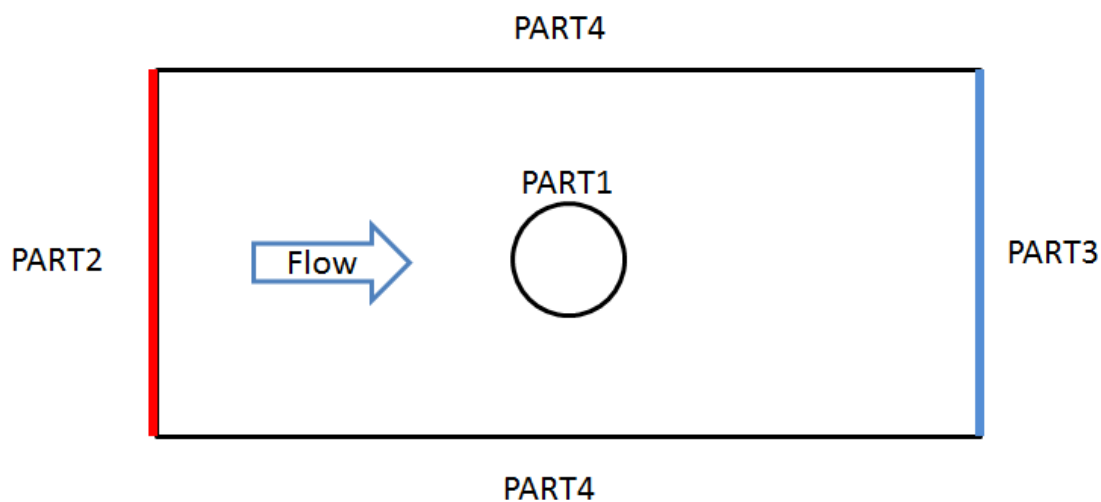


Fig. 3.4 2次元円柱周りの流れ解析
PART の割り当てと境界条件について

次に、流体解析の信頼性の指標とされているクーラン数 C について述べる。
クーラン数 C は

$$C = \frac{u \Delta t}{\Delta L} \quad (3.1.1)$$

で与えられる。ここで、 u は主流速度[m/s]、 Δt は解析時間間隔[s]、 ΔL は 1 要素の間隔[m]を表す。クーラン数が 1 を大きく上回る解析では、単位時間あたりの流体の移動が複数の要素をまたぐので、信頼性が損なわれると言われている。本研究では、撮影動画や過去の研究⁽⁷⁾を踏まえ、ツバメが 10[m/s]で飛行していると仮定して解析を行ったため、 $u=10$ [m/s] とした。また、モデルの形状を再現するにあたり、1 要素のサイズが 0.008 [m] を上回るとモデルが荒くなり、解析エラーを生じてしまうため、 $\Delta L=0.008$ [m] とした（ただし、要素に依って大きさは 20%程度異なる）。 $C=1$ と仮定した場合、 $dt=0.0008$ [s] に決定するべきだが、計算コストと単位時間の扱いやすさを考えて $dt=0.001$ [s] とした。従って、この解析におけるクーラン数は式より

$$C=1.25$$

になる。

メッシュサイズの選定に関しては第 3.5 節で詳細を述べる。

3.2 定常解析モデルの作成方法と詳細

本解析ではモデル作成の参考のためにツバメの剥製を入手した。ツバメは滑空状態に近い姿勢をしている剥製を選択した。Fig. 3.5a ~ Fig. 3.5c にツバメの剥製を3方向から撮った際の写真を記載する。



Fig. 3.5a ツバメの剥製 正面



Fig. 3.5b ツバメの剥製 下面



Fig. 3.5c ツバメの剥製 側面

次に、下記にモデル作成手順を記載する。

1. PC 用のカメラハードウェア, kinect(microsoft)でツバメの剥製を撮影する。
2. 撮影した画像を専用ソフト, kinect for windows で処理し, STL ファイルとして出力する。
3. STL ファイルを SolidWorks で読み込み, 形状を参考にしつつフューチャーを形成する。特に形状が複雑な主翼断面は, 鳥類の翼断面プロットデータをインポートして作成する。⁽¹⁰⁾
4. 作成したファイルを IGIS ファイルとして出力し, 解析補助ソフト LS-Prepost で読み込む。選択した表面をオートメッシングし, 解析用の節点と要素を生成する。

次に、解析対象について述べる。軌道計測実験の撮影時に肉眼で見たツバメのサイズや、インターネット上の生息情報⁽¹¹⁾から、一般的なツバメだと考えられたため、入手したツバメの剥製はモデル参考に適していると判断した。

また撮影動画より、ツバメ尾翼動作の特徴として「尾翼を閉じたり開いたりすること」と「尾翼を腹部方向へ折り曲げること」が挙げられたため、ツバメの飛行の姿勢パラメータを 迎角 α [deg]、尾翼角度 β [deg]、尾翼の展開の有無で分類した。 α は 0[deg]から 20[deg]まで 10[deg]刻みで、 β は 0[deg]から 20[deg]まで 20[deg]刻みでモデルを作成し、更にそれぞれのモデルを尾翼の展開の有無 (open or close) で分別した。従って、用意したモデルの合計は $3 \times 2 \times 2 = 12$ 種類になる。

Fig. 3.6 に $\alpha=0$ [deg]、 $\beta=0$ [deg]、open tail のモデルを例として挙げる (mm 単位)。ここで示す図は SolidWorks 上の IGES モデルであり、解析用メッシュを作成する前の段階である。翼長、全長寸法はツバメの剥製サイズを参考に決定した。しかし鳥類の形状は複雑なため、実際のツバメと完全に一致させることは難しく、評価関数も持たないことを述べておく。

また尾翼角度 $\beta > 0$ [deg]のモデルは、尾翼部分を腹部方向へ回転させた。例として $\alpha=0$ [deg]、 $\beta=20$ [deg]、open tail の側面図を Fig. 3.7 に示す。

また尾翼が展開していないモデルの例として、 $\alpha=0$ [deg]、 $\beta=0$ [deg]、close tail のモデルを Fig.3.8 に示す。

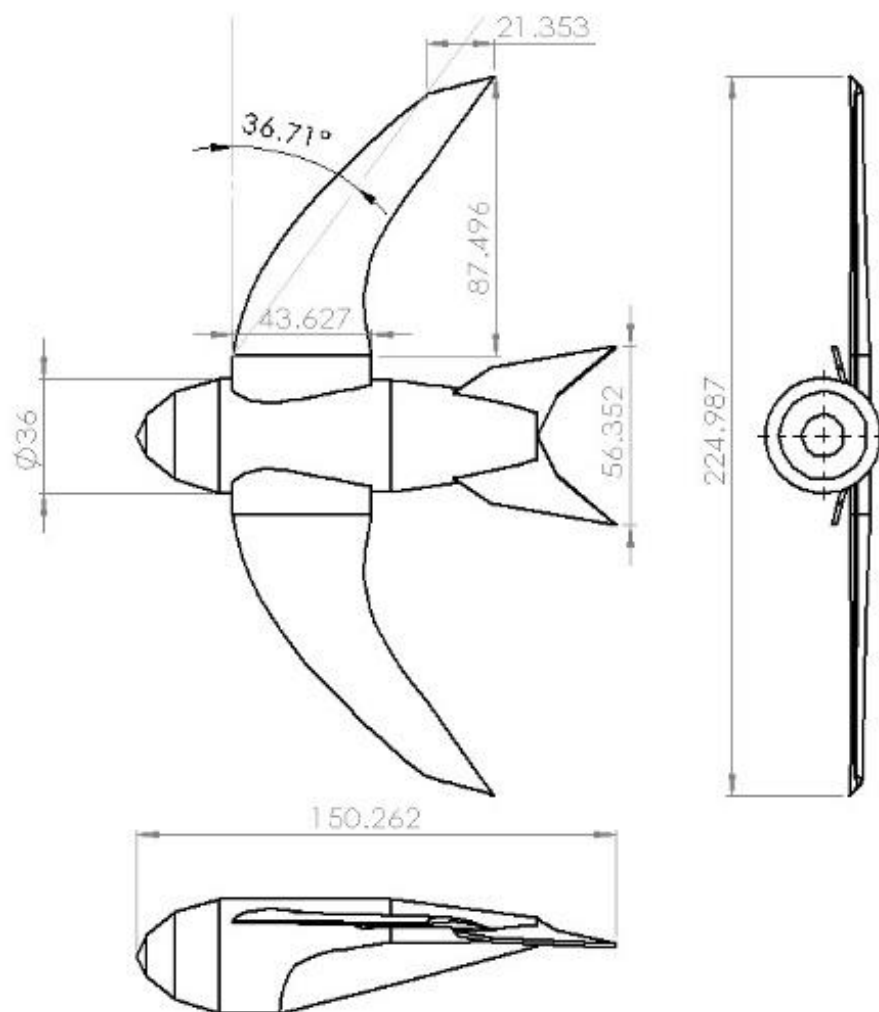


Fig. 3.6 ツバメモデル $\alpha=0$, $\beta=0$, open

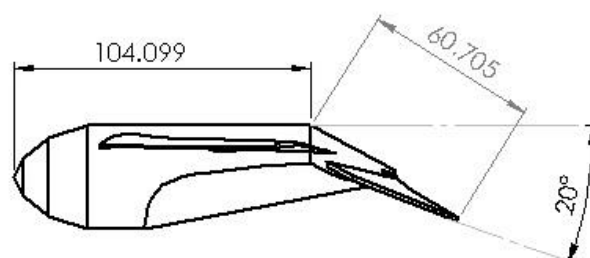


Fig. 3.7 ツバメモデル $\alpha=0$, $\beta=20$, open

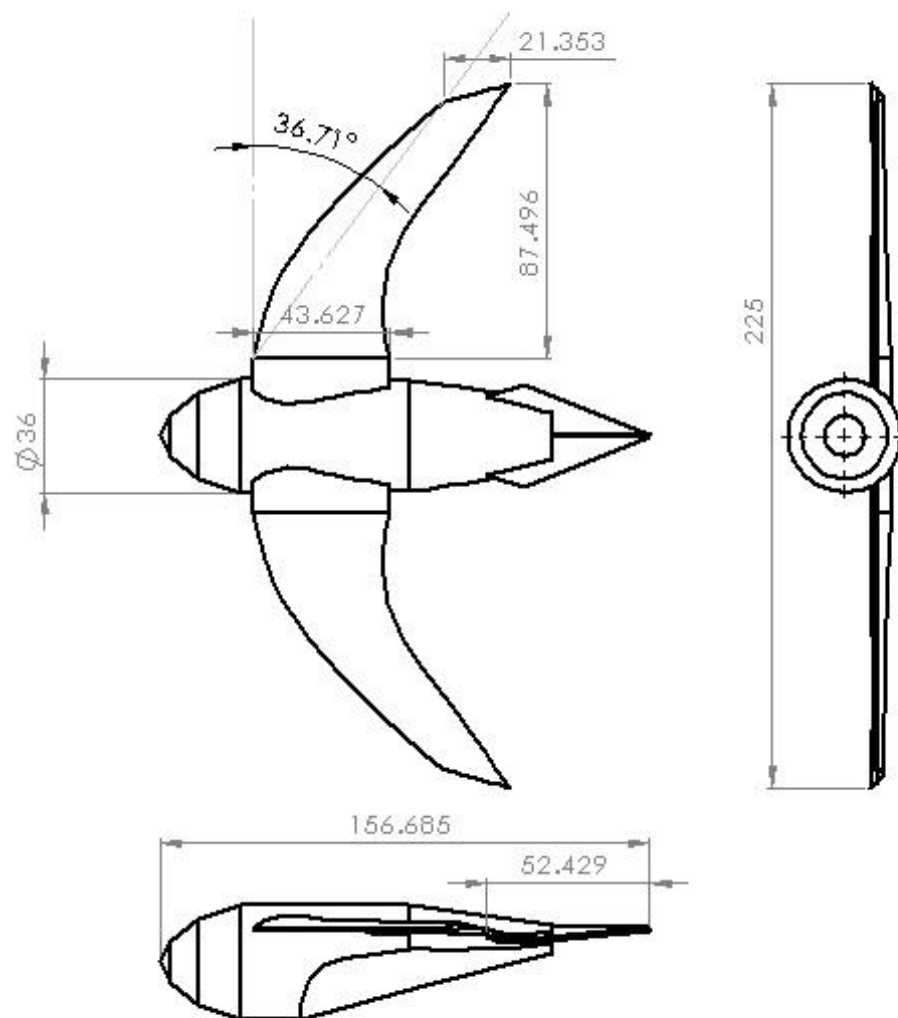


Fig. 3.8 ツバメモデル $\alpha=0$, $\beta=0$, close

これらの IGES ファイルを LS-Prepost で読み込み、メッシュ作成をしたモデルを Fig. 3.9 に示す。Fig. 3.9 からわかるように、本解析では流れ方向を x 軸，翼長方向を y 軸，上下方向を z 軸とした。

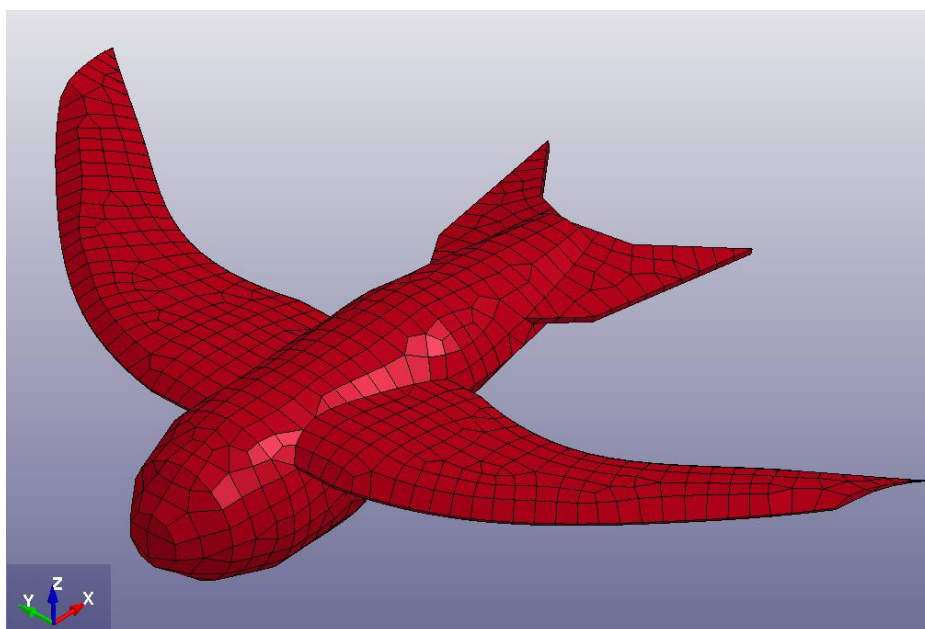


Fig. 3.9 ツバメモデル $\alpha=0$, $\beta=0$, open (メッシュ作成後)

3.3 解析結果と考察

3.3.1 揚力, 抗力, 揚抗比について

下記に解析条件の一覧を記載する.

【支配方程式】 ナビエ・ストークス方程式

【計算手法】 有限要素法

【時間発展の取り扱い】 陰解法

【メッシュタイプ】 テトラ要素

【メッシュサイズ】 0.008[m] (壁面メッシュサイズ)

【使用モデル】

迎角: $\alpha = 0, 10, 20$ [deg]

尾翼角度: $\beta = 0, 20$ [deg]

尾翼の開閉: open, close

計 12 種

【解析時間】 5 [s]

【解析時間間隔】 0.001 [s]

【境界条件 流速】 10 [m/s] (流入面に一様)

【境界条件 圧力】 0 [Pa] (流出面に一様)

【クーラン数】 $C = U \cdot dt / L = 10 \times 0.001 / 0.008 = 1.25$

(要素によりサイズが異なるため参考値として)

Fig. 3.10~Fig. 3.17 に各角度における時間-揚力, 抗力グラフを記す.

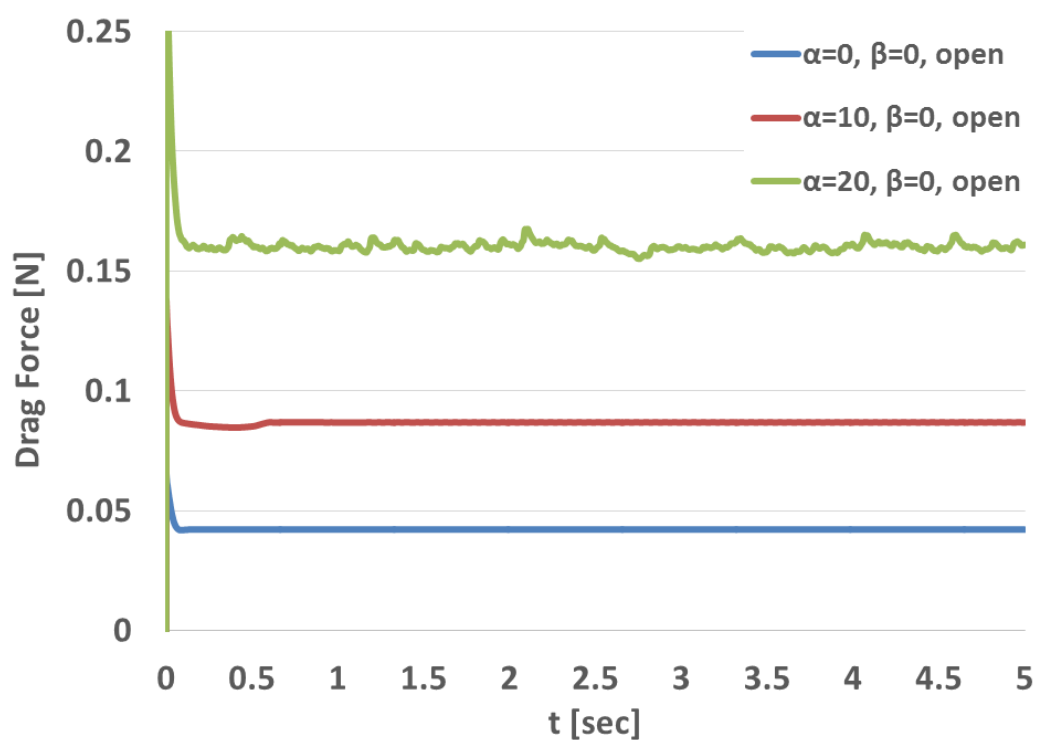


Fig. 3.10 抗力の時間変化 $\alpha=0, 10, 20, \beta=0, \text{open}$

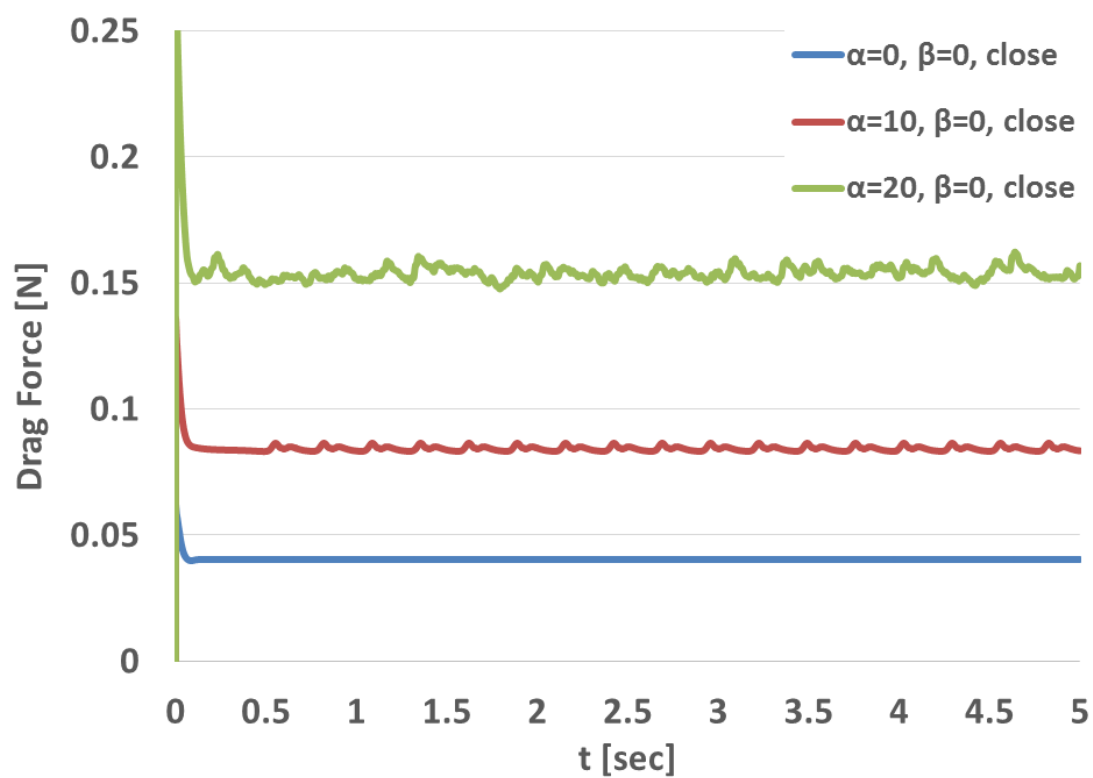


Fig. 3.11 抗力の時間変化 $\alpha=0, 10, 20, \beta=0, \text{close}$

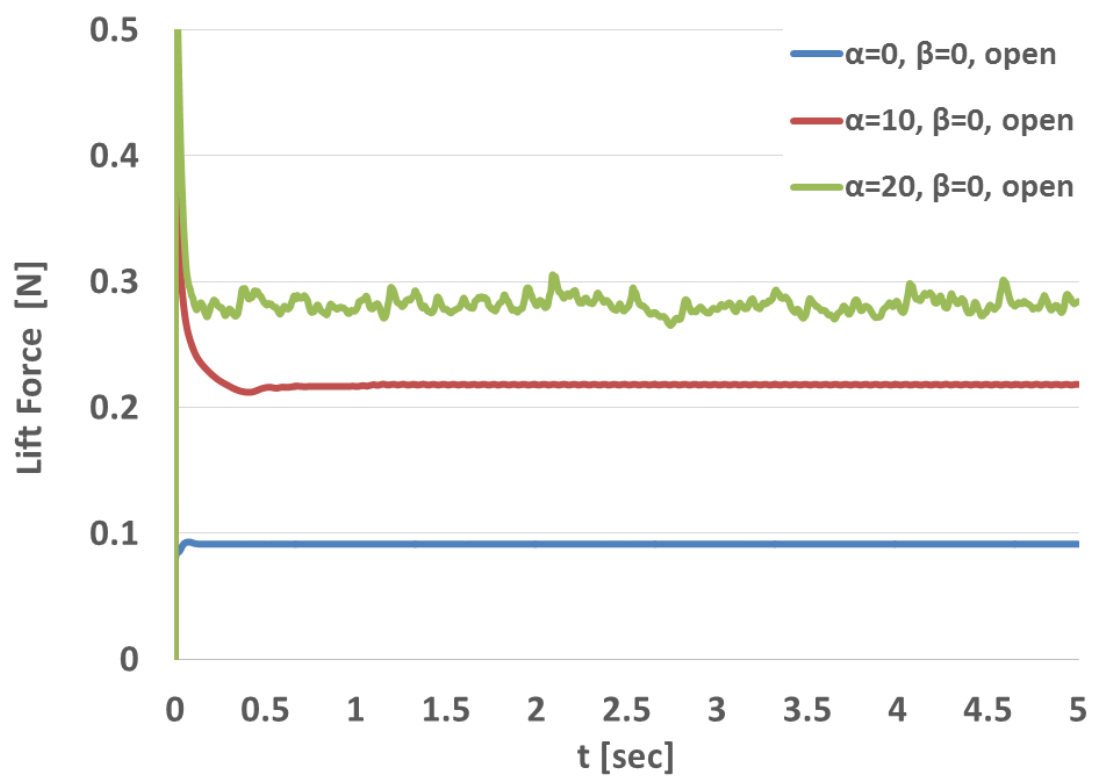


Fig. 3.12 揚力の時間変化 $\alpha=0, 10, 20, \beta=0, \text{open}$

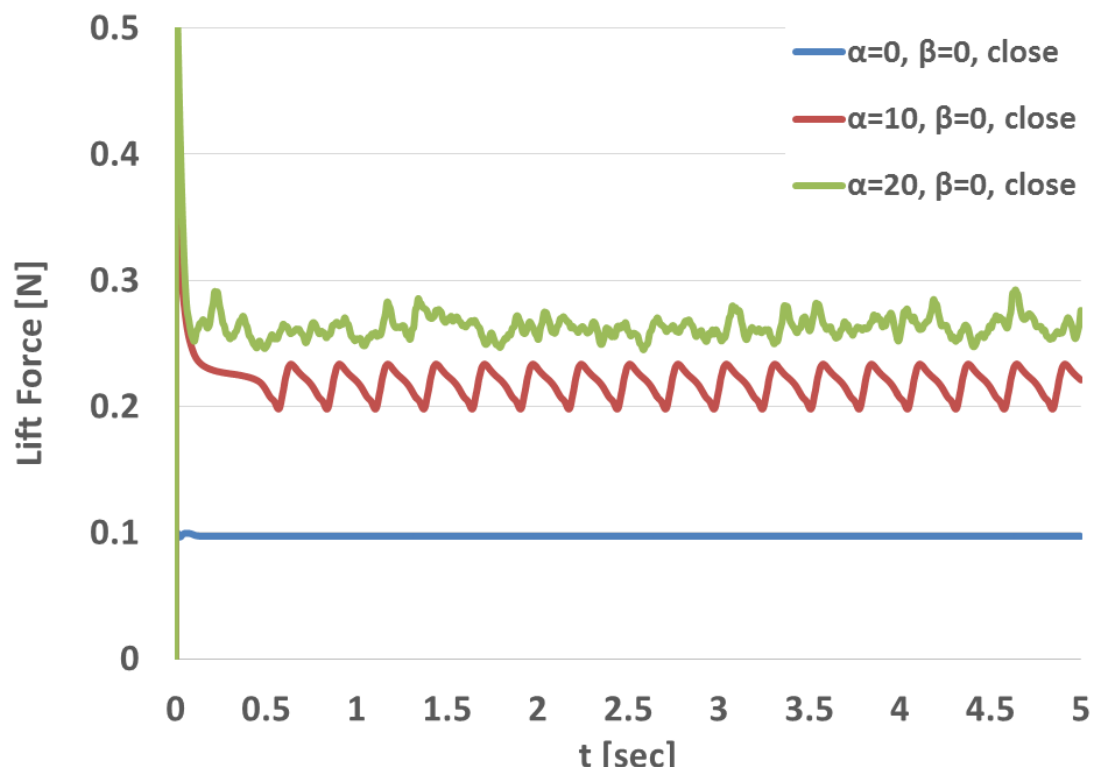


Fig. 3.13 揚力の時間変化 $\alpha=0, 10, 20, \beta=0, \text{close}$

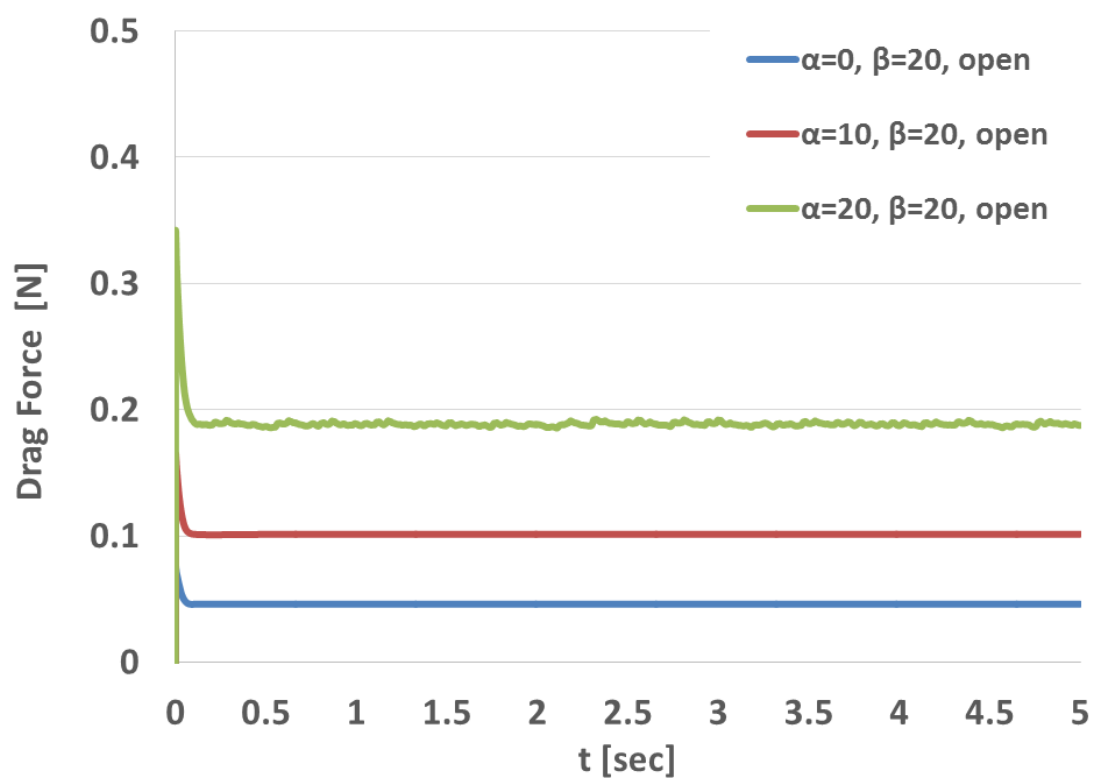


Fig. 3.14 抗力の時間変化 $\alpha=0, 10, 20, \beta=20, \text{open}$

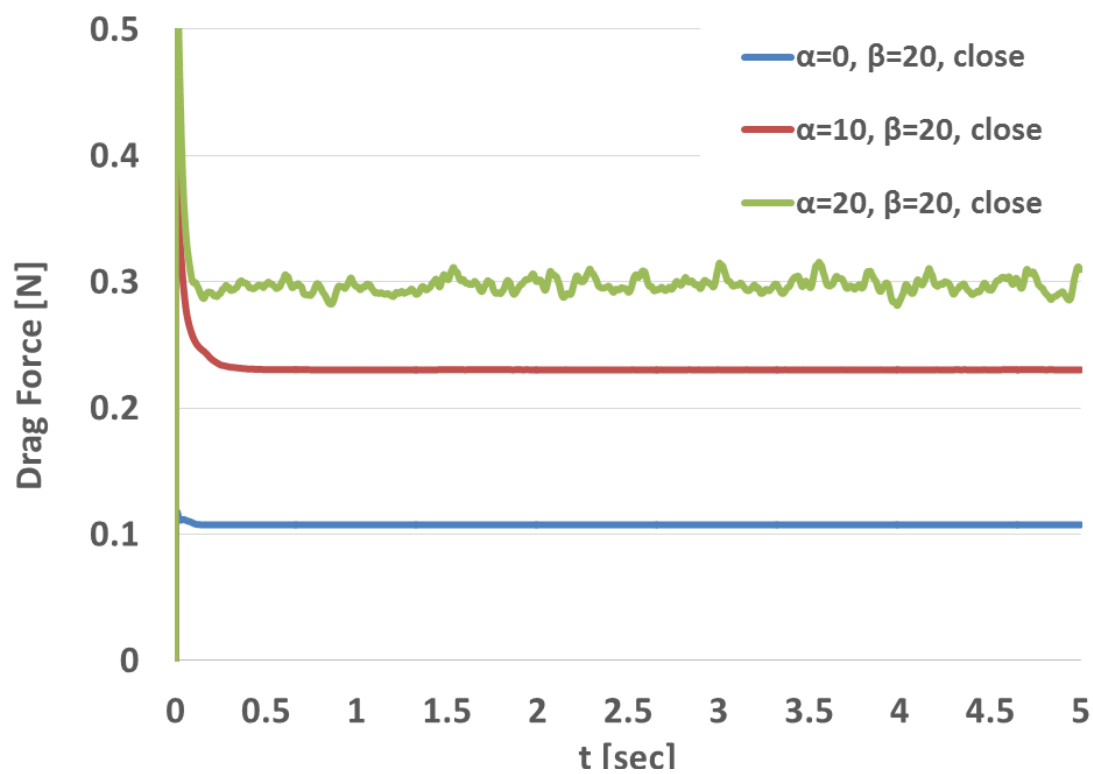


Fig. 3.15 抗力の時間変化 $\alpha=0, 10, 20, \beta=20, \text{close}$

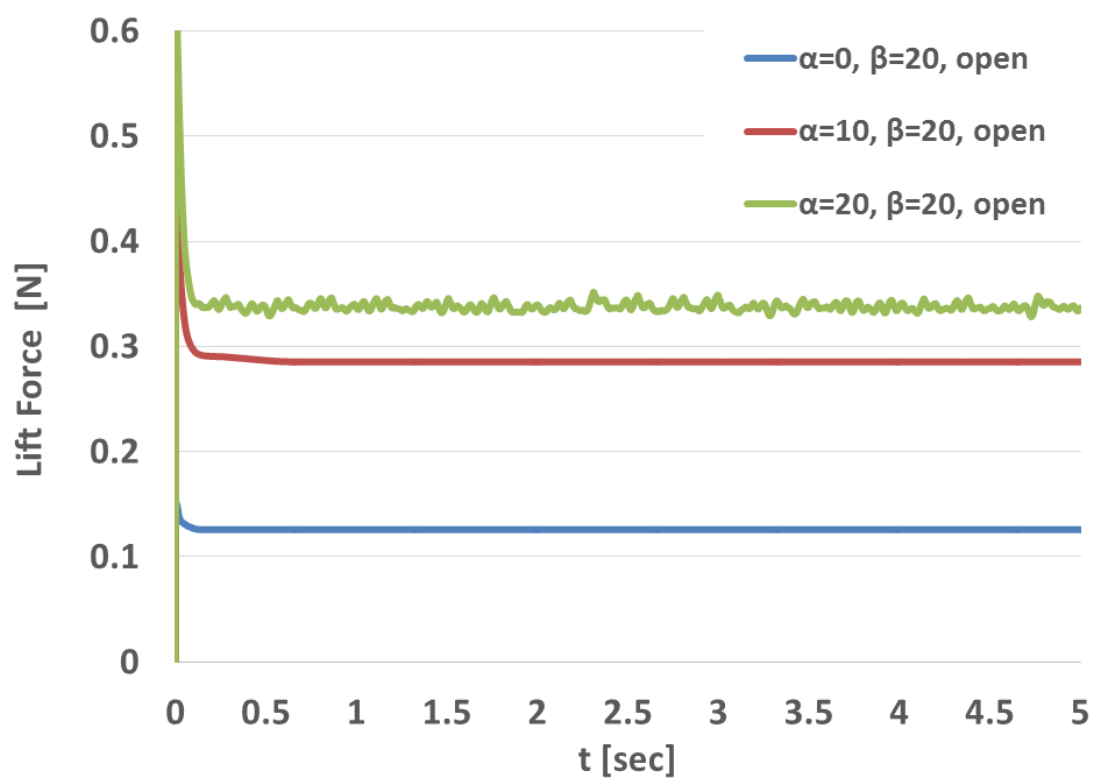


Fig. 3.16 揚力の時間変化 $\alpha=0, 10, 20, \beta=20, \text{open}$

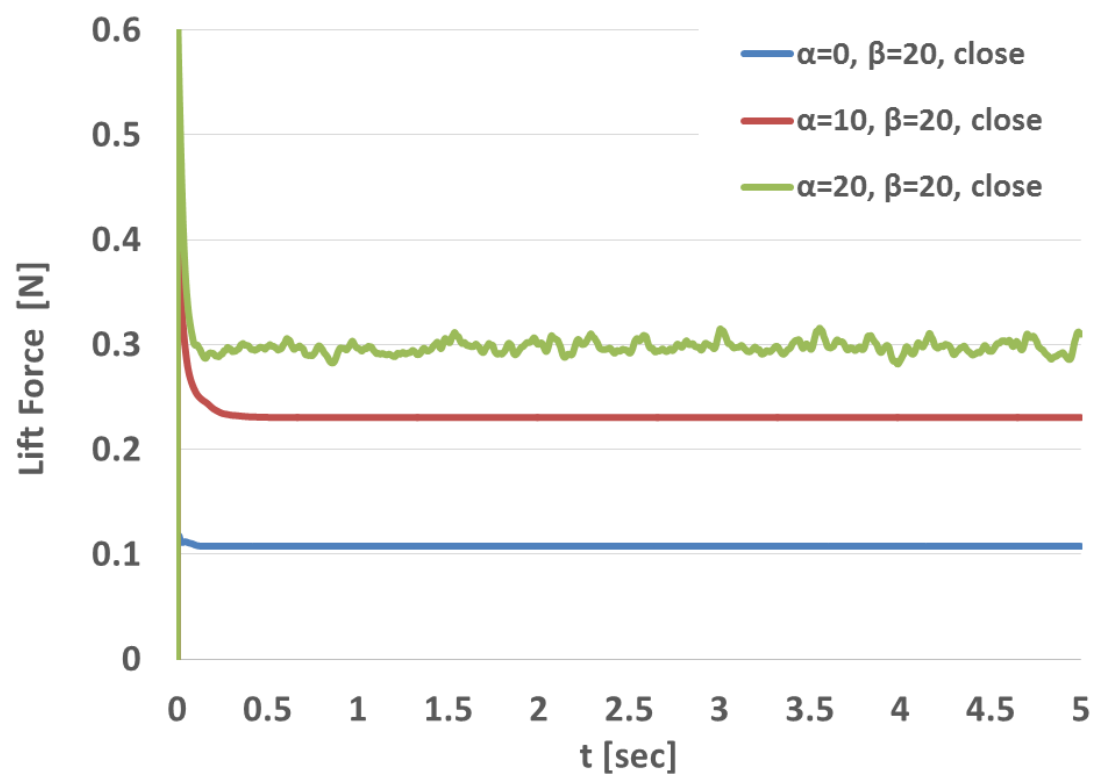


Fig. 3.17 揚力の時間変化 $\alpha=0, 10, 20, \beta=20, \text{close}$

【抗力について open, close で比較 ($\alpha=0, 10, 20$ $\beta=0$)】

Fig. 3.10 と Fig. 3.11 で抗力について open, close で比較すると、迎角 α が増加すると抗力が増加していることがわかる。この傾向は他の抗力グラフでも同様であり、 α が増加すると流れ方向から見た時の投影面積が増加したため、抗力が増加したと考えられる。

Fig. 3.10 と Fig. 3.12 の $\alpha=10$ について着目すると、open では時間経過による抗力の変化はほぼ見受けられないが、close では周期性をもったわずかな乱れが確認できる。

Fig. 3.10 と Fig. 3.11 の $\alpha=20$ について着目すると、open, close いずれについても抗力の乱れを確認できる。open については ± 0.005 [N]程度、close については 0.01 [N]程度の乱れを持ち、open の方が close に比べて乱れが小さい結果となった。

【揚力について open, close で比較 ($\alpha=0, 10, 20$ $\beta=0$)】

Fig. 3.12 と Fig. 3.13 で揚力について open, close で比較すると、迎角 α が増加すると揚力が増加していることがわかる。この傾向は他の揚力グラフでも同様であり、抗力と同様に、 α が増加すると流れ方向から見た時の投影面積が増加したため、揚力が増加したと考えられる。Fig. 3.12 と Fig. 3.13 の $\alpha=10$ について着目すると、open では時間経過による揚力の変化はほぼ見受けられないが、close では ± 0.02 [N]程度の乱れがある。この傾向は抗力の比較結果と同様である。また、このみだれは周期性を持つため、 α が増加に起因する周期的な渦の生成が予想される。

Fig. 3.12 と Fig. 3.13 の $\alpha=20$ について着目すると、open, close いずれについても揚力の乱れを確認できる。open については ± 0.01 [N]程度、close については 0.025 [N]程度の乱れを持ち、open の方が close に比べて乱れが小さい結果となった。

【抗力について open, close で比較 ($\alpha=0, 10, 20$ $\beta=20$)】

Fig. 3.14 と Fig. 3.15 で抗力について, open と close を比較すると, open のほうが close よりも乱れが小さいという傾向は $\beta=0$ の結果と類似している.

【揚力について $\beta=0$, $\beta=20$ で比較 ($\alpha=0, 10, 20$ open)】

Fig. 3.12 と Fig. 3.16 で揚力について, $\beta=0$ と $\beta=20$ を比較すると, いずれの時刻においても $\beta=20$ の方が $\beta=0$ よりも揚力が大きくなっている. $\alpha=20$ の平均値で比較すると, $\beta=20$ は $\beta=0$ よりも揚力が約 $0.1[\text{N}]$ 大きい. ツバメの重量が $20[\text{g}]$ と仮定した場合, ツバメにかかる重力の大きさは約 $0.2[\text{N}]$ となり, これを上回る揚力を得た時にツバメは上昇する. それを踏まえると, $0.1[\text{N}]$ はツバメにかかる重力の約 50% に相当するため, この増加量は非常に大きいと言える. 揚力増加の原因は α の増加と同様に, 尾翼を折り曲げることで投影面積が増えたため揚力が増加したと考えられる. また, この傾向は抗力についても同様である.

【揚力について $\beta=0$, $\beta=20$ で比較 ($\alpha=0, 10, 20$ close)】

Fig. 3.13 と Fig. 3.17 で揚力について, $\beta=0$ と $\beta=20$ を比較すると, いずれの時刻においても $\beta=20$ の方が $\beta=0$ よりも揚力が大きくなっている. $\alpha=20$ の平均値で比較すると, $\beta=20$ は $\beta=0$ よりも揚力が約 $0.04[\text{N}]$ 大きい. しかしながら, この増加量は open の場合の増加量の約 4 割にしか相当せず, 尾翼を折り曲げることによる揚力の増加効率は open に比べて小さい. 従って, ツバメが尾翼動作を活用して揚力を得る場合, 尾翼を close するよりも open したほうが効率が良いと言える.

次に各姿勢について、横軸を α 、縦軸を揚力、抗力とした図を Fig. 3.18, Fig. 3.19 に示す。また、Fig. 3.20 は横軸を α 、縦軸を揚抗比（揚力を抗力で除したもの）としたグラフを表す。なお、これらのグラフで用いた揚力と抗力は、流れが定常とみなせる $t= 1\sim 5$ [s]の間の平均値を使用した。

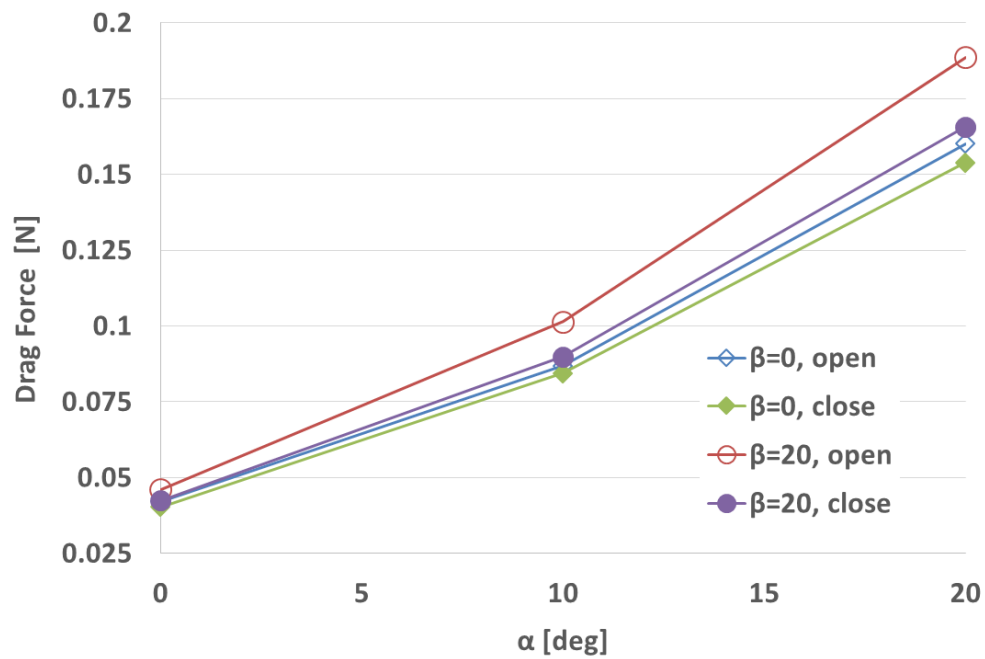


Fig. 3.18 迎角 α と抗力のグラフ

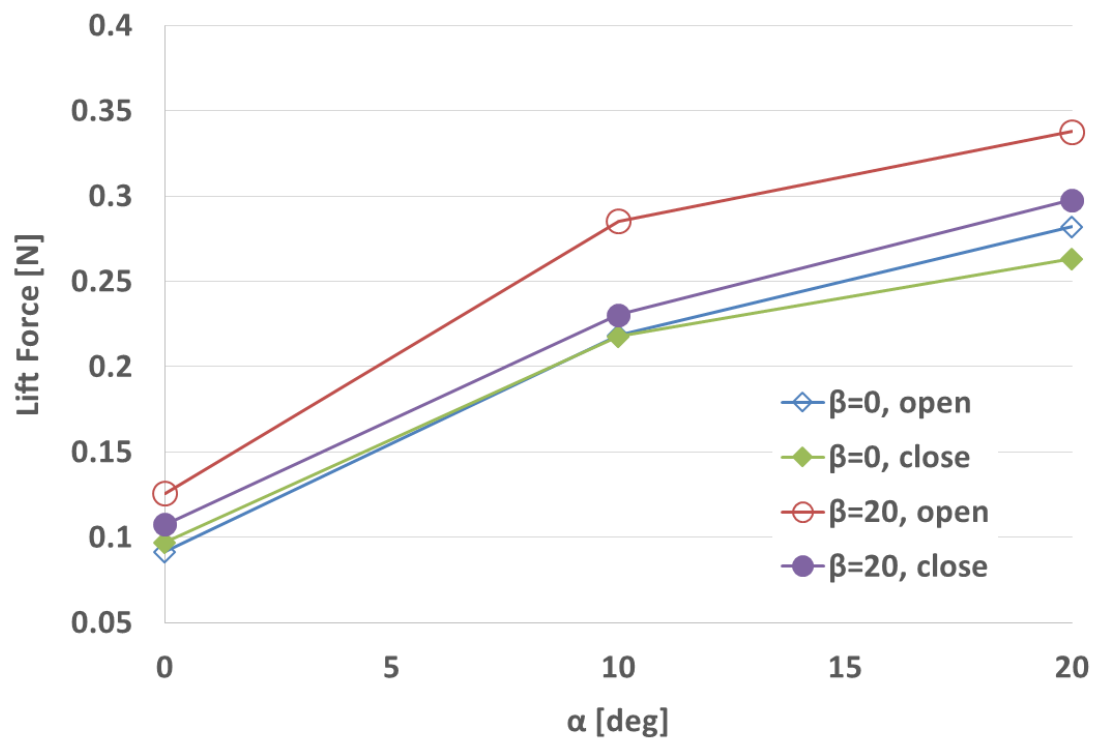


Fig. 3.19 迎角 α と揚力のグラフ

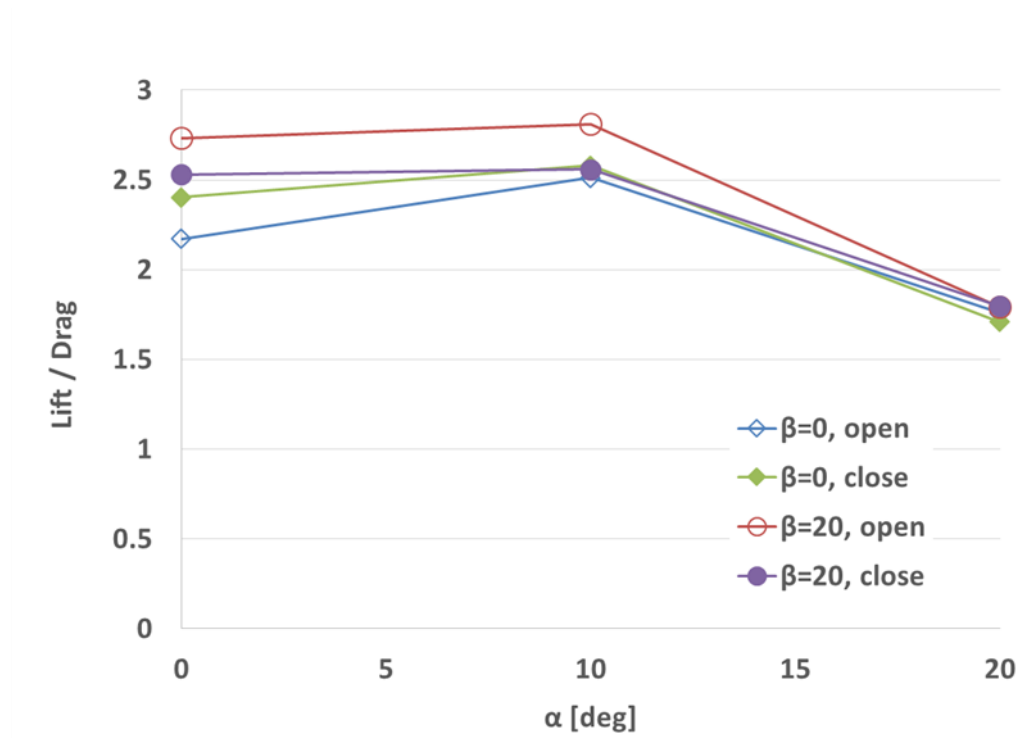


Fig. 3.20 迎角 α と揚抗比の関係

Fig. 3.18 と Fig. 3.19 をみると、抗力、揚力ともに $\alpha=20$, $\beta=20$, open の姿勢が一番大きいことがわかる。これは、 $\alpha=20$, $\beta=20$, open のときに最も投影面積が大きくなるためだと考えられる。

またこれまで揚力と抗力について考察したが、揚力が増加しても抗力が増加してしまう場合、総合的に見て飛行性能は落ちてしまう。従って航空力学では揚力と抗力の比、揚抗比を、飛行性能を表す 1 つの指標として取り扱うことが多い。Fig. 3.20 で揚抗比について考察すると、 $\alpha=0$, 10 においては $\beta=20$, open の姿勢が最も揚抗比が大きく $L/D=2.8$ を示している。 $\alpha=20$ になると、 β や open など姿勢パラメータに関わらず $L/D \approx 1.8$ 程度になっていることがわかる。これは α が 10deg よりも大きくなりすぎると、揚力の増加に対して抗力の増加のほうが大きくなるためだと考えられる。

また $\alpha=0$ において、close の時は尾翼角度 β が 0[deg] から 20[deg] へ増加したことによる揚抗比の増加が 0.1 程度だが、open の時は約 0.5 増加している。

3.3.2 圧力分布, 渦度分布, 流線について

この節では, データ可視化ソフト paraview を用いた各種可視化情報について考察する. 本研究では各姿勢における解析結果について, 圧力分布, 渦度分布, 流線で比較した.

まず圧力分布について述べる. Fig. 3.21a ~ Fig. 3.21c は $\alpha=10$, $\beta=0$, open の姿勢の圧力分布を表す. Fig. 3.21a を基準 $t=3.00[s]$ とし, Fig. 3.21b は $0.25[s]$ 後の, Fig. 3.21c は $0.50[s]$ 後の分布を表す. 各図中の青い面は $-5[Pa]$ の等値面を, 白い面は $-2.5[Pa]$ の等値面を, 赤い面は $0[Pa]$ の等値面を表す.

また, Fig. 3.22a ~ Fig. 3.22c には同様に処理した $\alpha=10$, $\beta=0$, close の圧力分布を記す.

Fig. 3.21a で open $t=3.00$ の圧力について考察すると, 尾翼の付け根 ($y=0$) の後流から放射状に $0[Pa]$ の面が広がっている事がわかる. 時間が経過してもその特徴はほぼ変わらず, 圧力分布はほぼ定常状態に保たれているといえる.

しかし, Fig. 3.22a で close $t=3.00$ の圧力についてみると, 尾翼の付け根後流に $-2.5[Pa]$ の負圧が発生していることがわかる. また, この負圧は約 $0.25[s]$ 刻みで周期的に発生し, Fig. 3.14 の揚力の乱れの周期と概ね一致する. 従って, $\alpha=10$, $\beta=0$, close の揚力の周期的な乱れには, 尾翼後方での負圧の圧力が要因の 1 つとして関与していると考えられる.

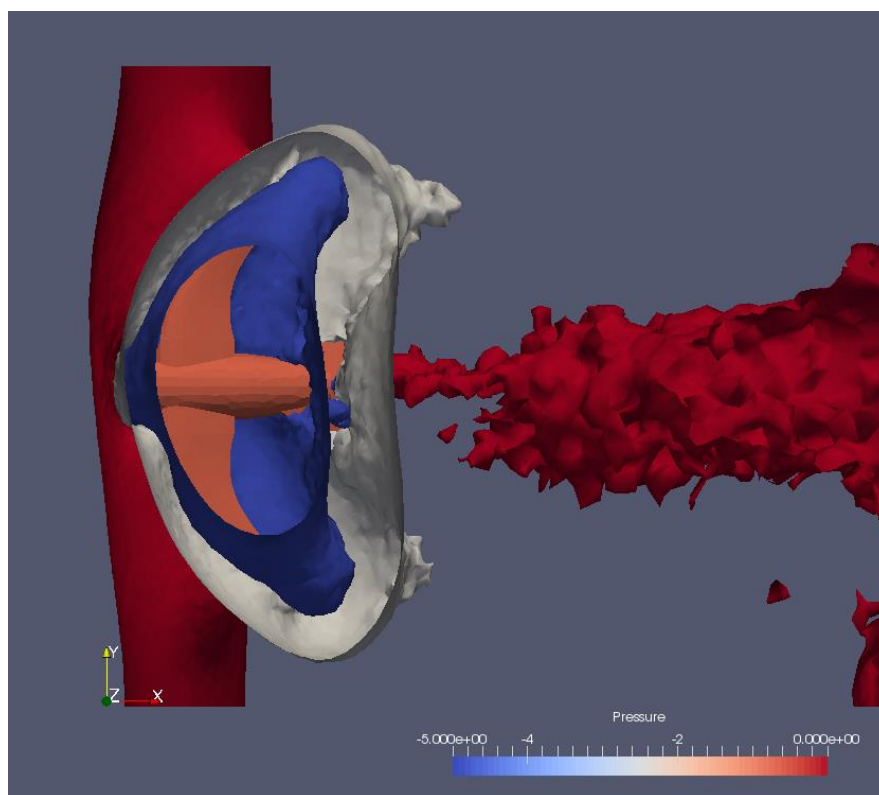


Fig. 3.21a 压力分布 $\alpha=10$, $\beta=0$, open ($t=3.00$)

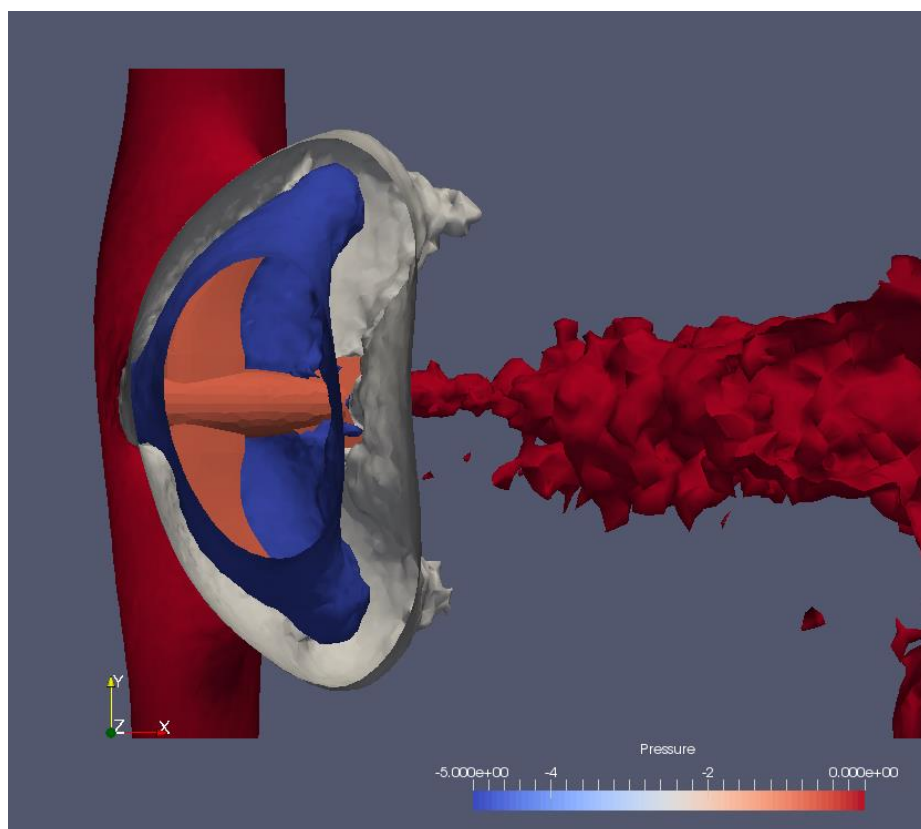


Fig. 3.21b 压力分布 $\alpha=10$, $\beta=0$, open ($t=3.24$)

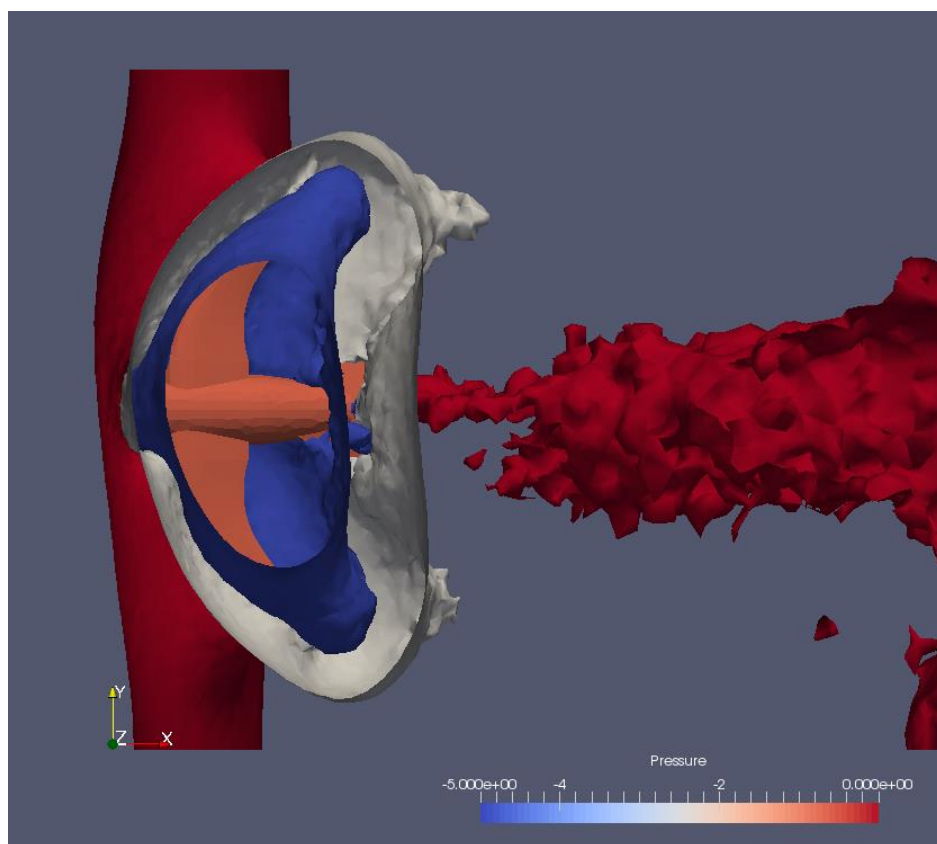


Fig. 3.21c 压力分布 $\alpha=10$, $\beta=0$, open ($t=3.50$)

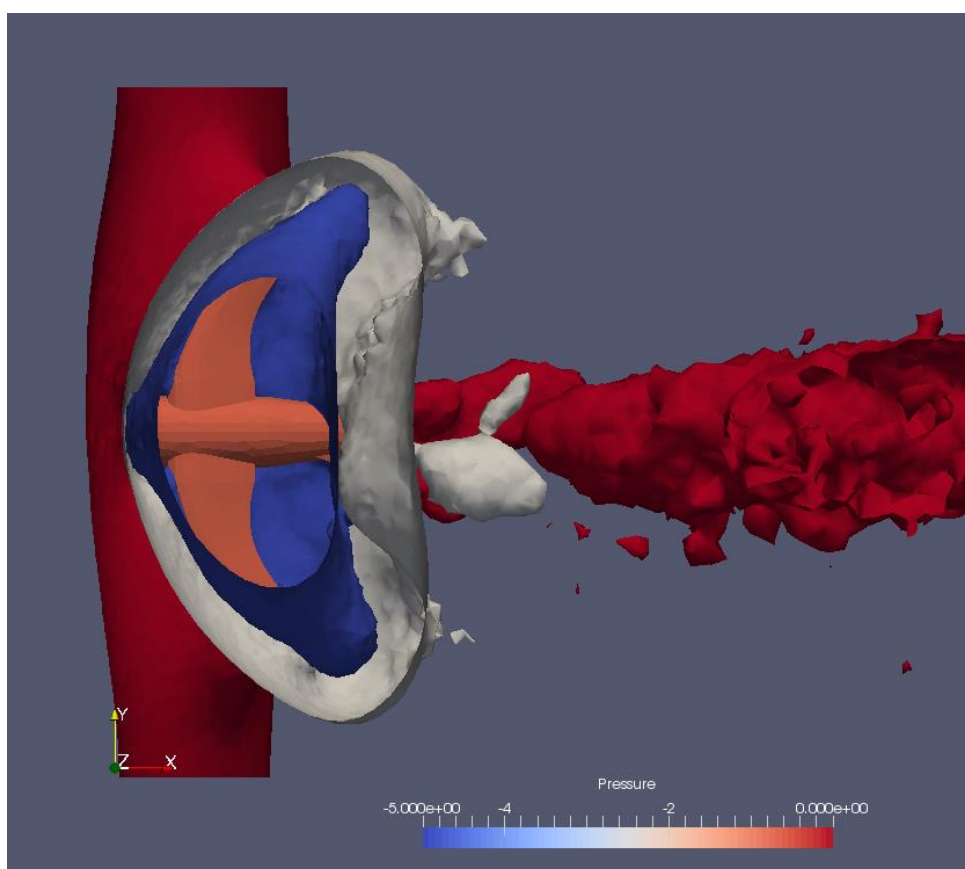


Fig. 3.22a 压力分布 $\alpha=10$, $\beta=0$, close ($t=3.00$)

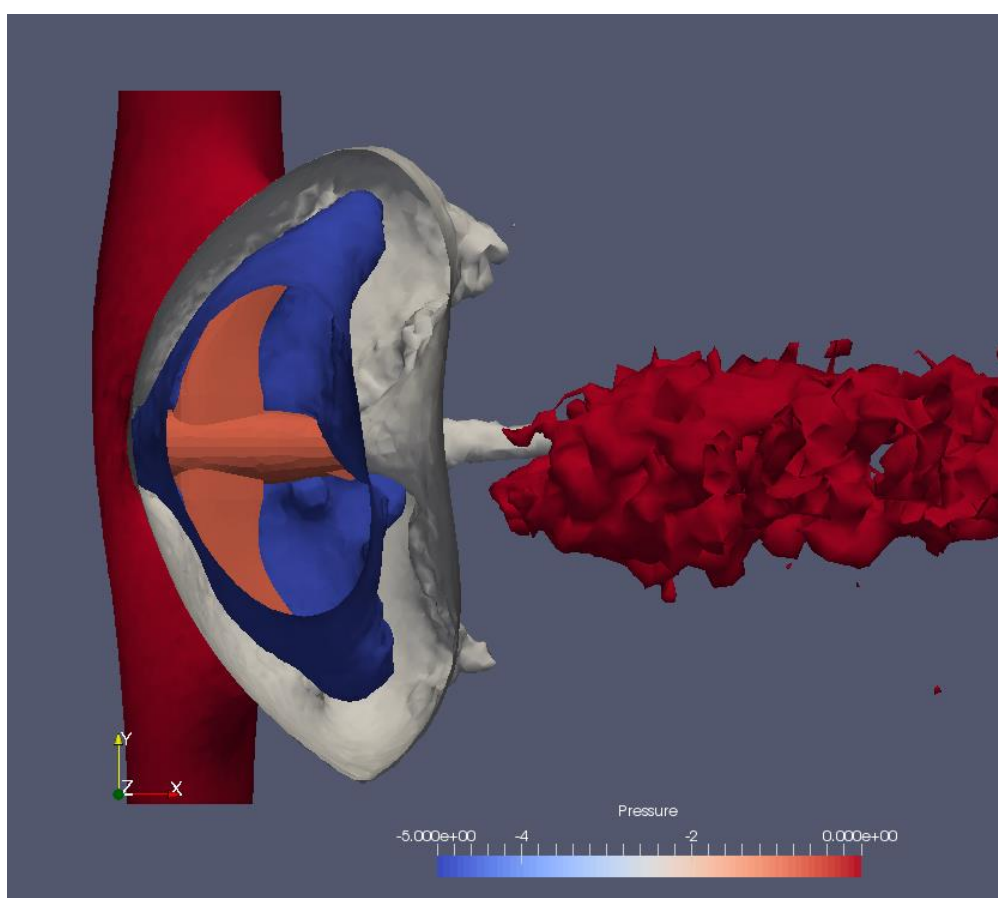


Fig. 3.22b 压力分布 $\alpha=10$, $\beta=0$, close ($t=3.24$)

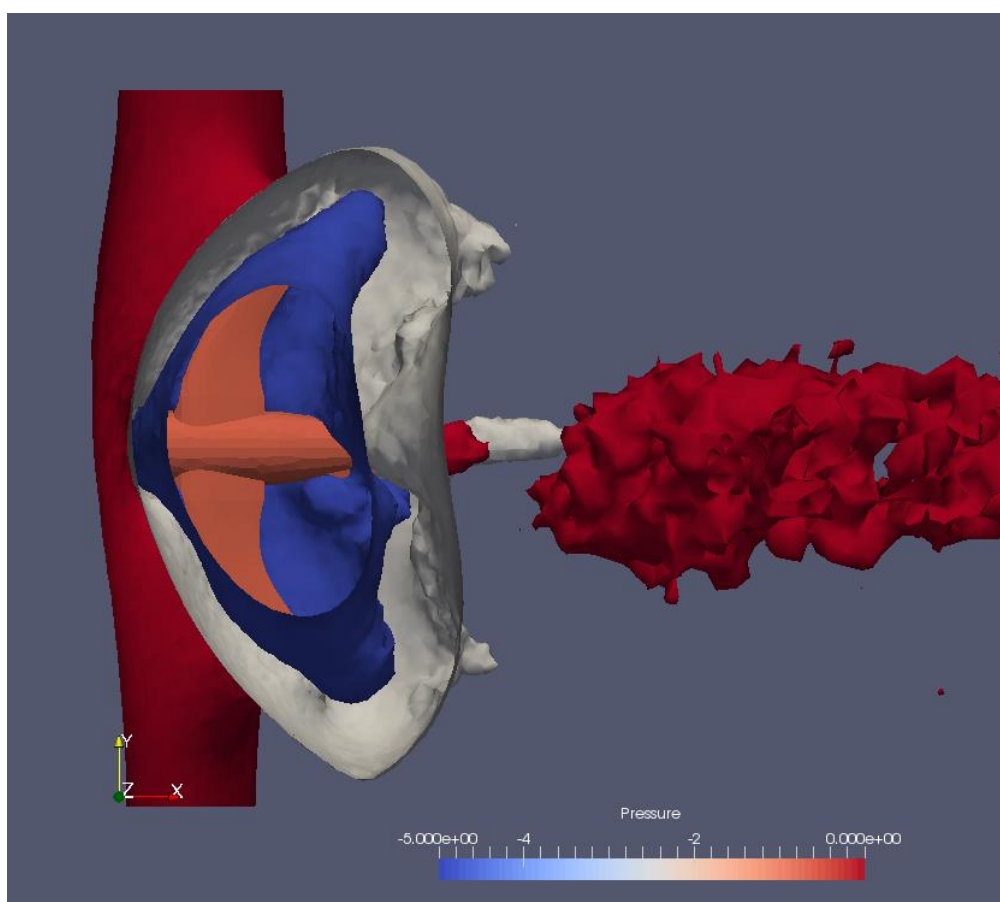


Fig. 3.22c 压力分布 $\alpha=10$, $\beta=0$, close ($t=3.50$)

次に渦度分布について考察する。 $\alpha=20$, $\beta=0$, open における渦度分布を, Fig. 3.23a ~ Fig. 3.23c に示す。 Fig. 3.23a を基準 $t=3.00[s]$ とし, Fig. 3.23b は $t=3.05[s]$, Fig. 3.23c は $t=3.10[s]$ における渦度分布を表す。 この図では尾翼の後流を YZ 平面で切り取り, その面に渦度を描画した。 渦度は x, y, z それぞれの成分の合成値としているため, カラーマップは単純に渦度の強さを表す。 また, $\alpha=20$, $\beta=0$, close について同様の処理をした図を Fig. 3.24a ~ Fig. 3.24c に示す。

Fig. 3.23a で open についてみると, 分かれた尾翼の先端部後流にそれぞれ渦が発生していることがわかる。 しかし Fig. 3.24a で close についてみると, 尾翼がわかれていないため渦は1つのみ発生している。 また open では時刻 t に依らずほぼ同様の渦度分布を保っているが, close では時刻 t によって渦度の分布が変化し, 渦度の大きさの変化や, 渦中心 (渦度が最も高い点) の移動が見られる結果となった。

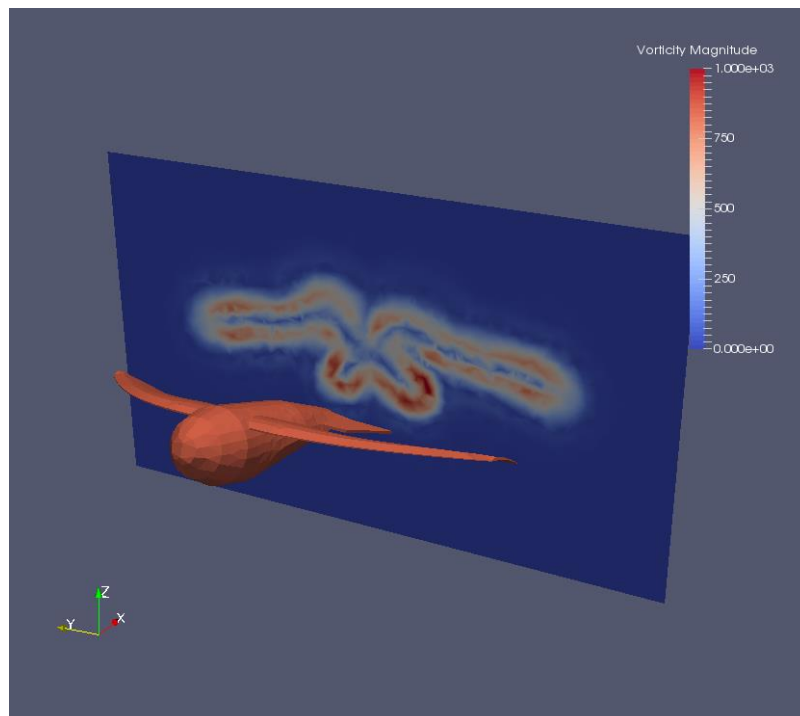


Fig. 3.23a 渦度分布 $\alpha=20$, $\beta=0$, open ($t=3.00$)

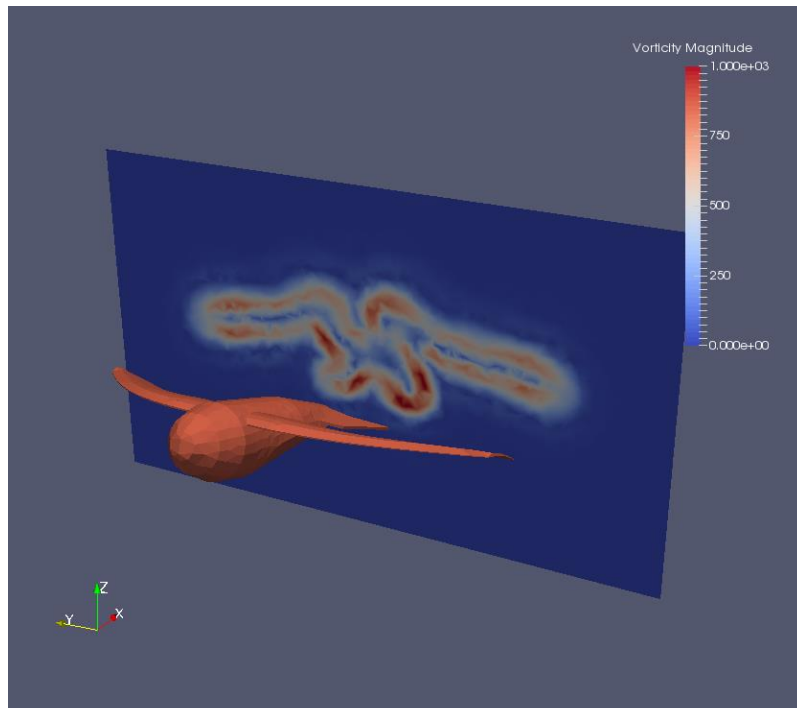


Fig. 3.23b 渦度分布 $\alpha=20$, $\beta=0$, open ($t=3.05$)

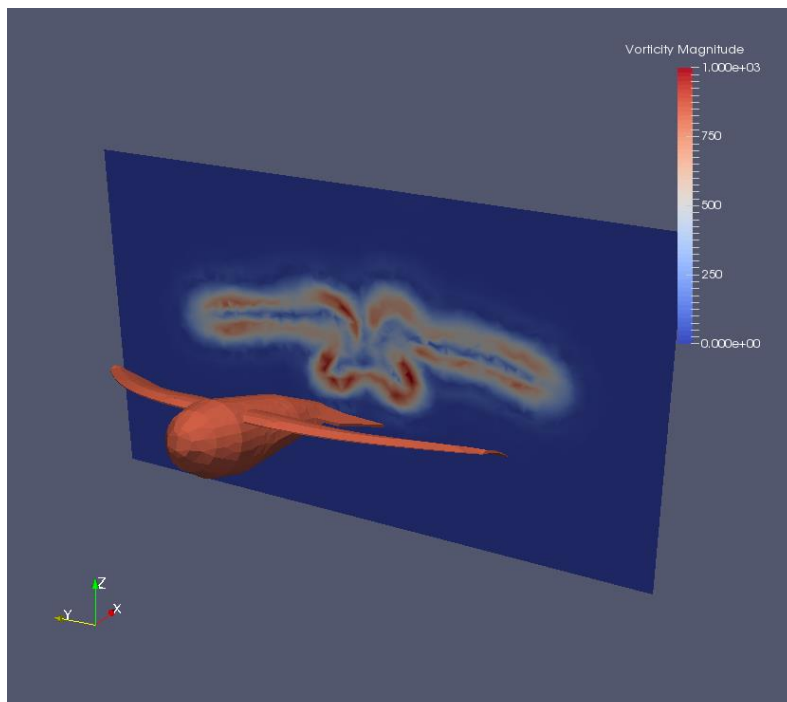


Fig. 3.23c 渦度分布 $\alpha=20$, $\beta=0$, open ($t=3.10$)

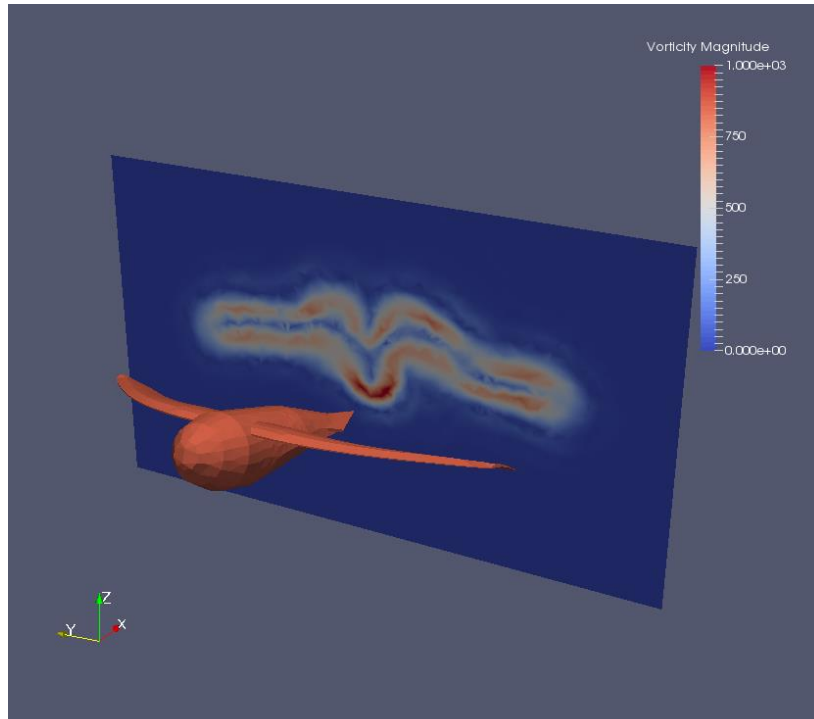


Fig. 3.24a 渦度分布 $\alpha=20$, $\beta=0$, close ($t=3.00$)

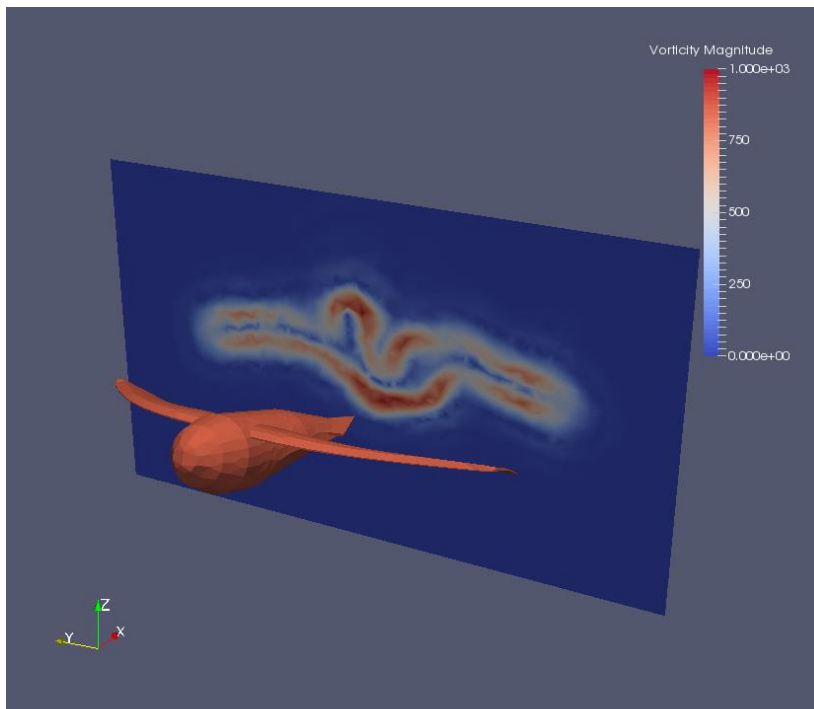


Fig. 3.24b 渦度分布 $\alpha=20$, $\beta=0$, close ($t=3.05$)

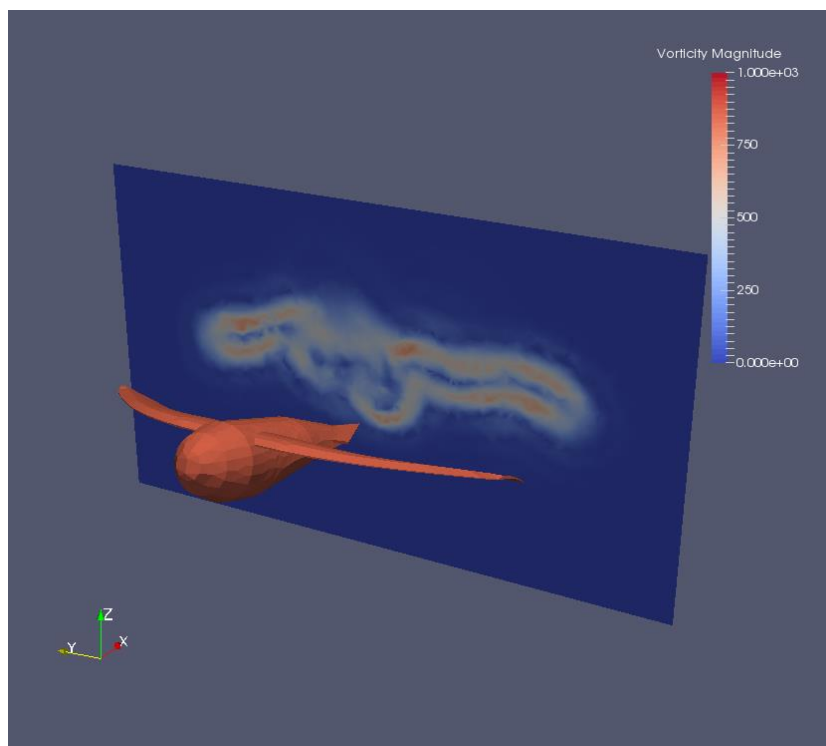


Fig. 3.24b 渦度分布 $\alpha=20$, $\beta=0$, close ($t=3.10$)

次に流線の様子について考察する。 $\alpha=20$, $\beta=0$, open における流線の様子を Fig. 3.25 に示す。流線の粒子は、左右の主翼の上流側から主翼の上面と下面をまたぐように配置した。また、最初の画像($t=3.00$)から 0.05s 刻みの流線を透過させ、合計で 5 枚の画像を重ね合わせている。また、 $\alpha=20$, $\beta=0$, close について同様の処理をした図を Fig. 3.26 に示す。

Fig. 3.25 で open についてみると、流れが尾翼先端部を過ぎると尾翼中心 ($y=0$) 方向へ向かう流線がいくつか存在することがわかる。更に後流にいくにつれて、流れは尾翼中心へ引き寄せられるようになっていく様子がわかる。

Fig. 3.26 で close についてみると、open と比べて流線の移動が小さく、尾翼中心へ向かう力が小さいことがわかる。これらの結果から、ツバメが尾翼を open した際は尾翼後方で尾翼中心へ巻き込むような渦が発生し、周囲の流れを引き寄せている可能性があると言える。

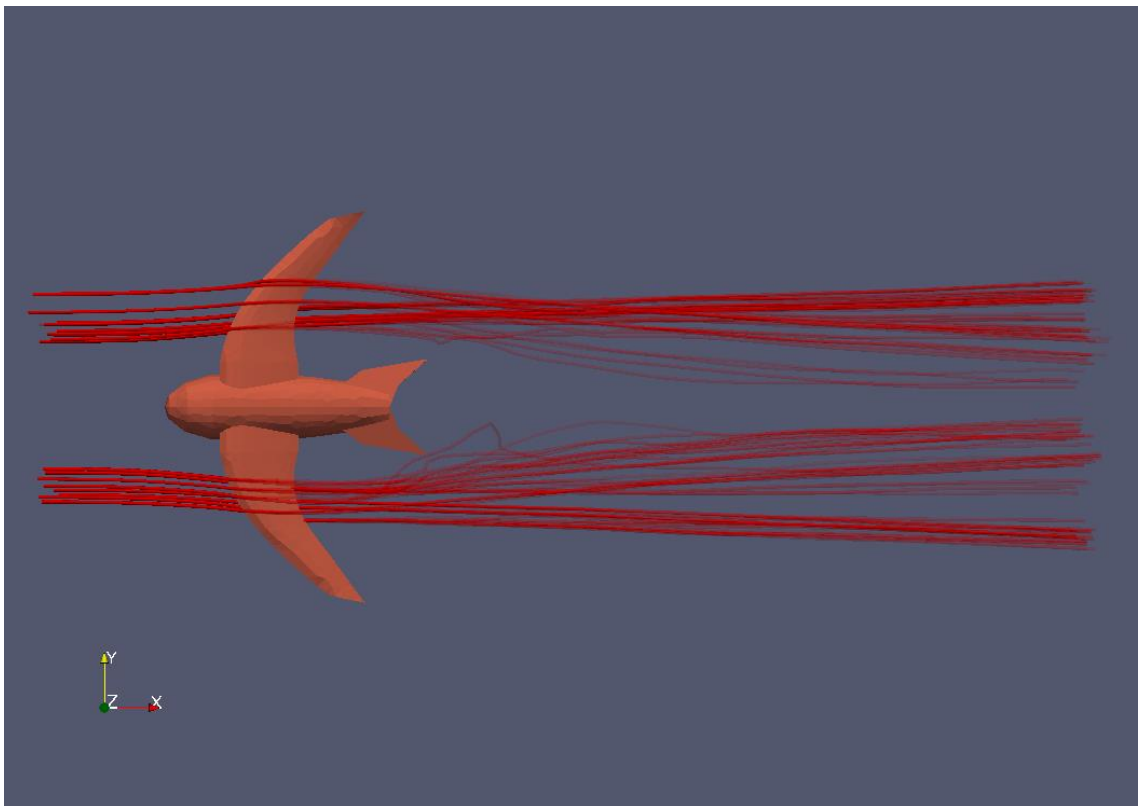


Fig. 3.25 流線の様子 $\alpha=20$, $\beta=0$, open

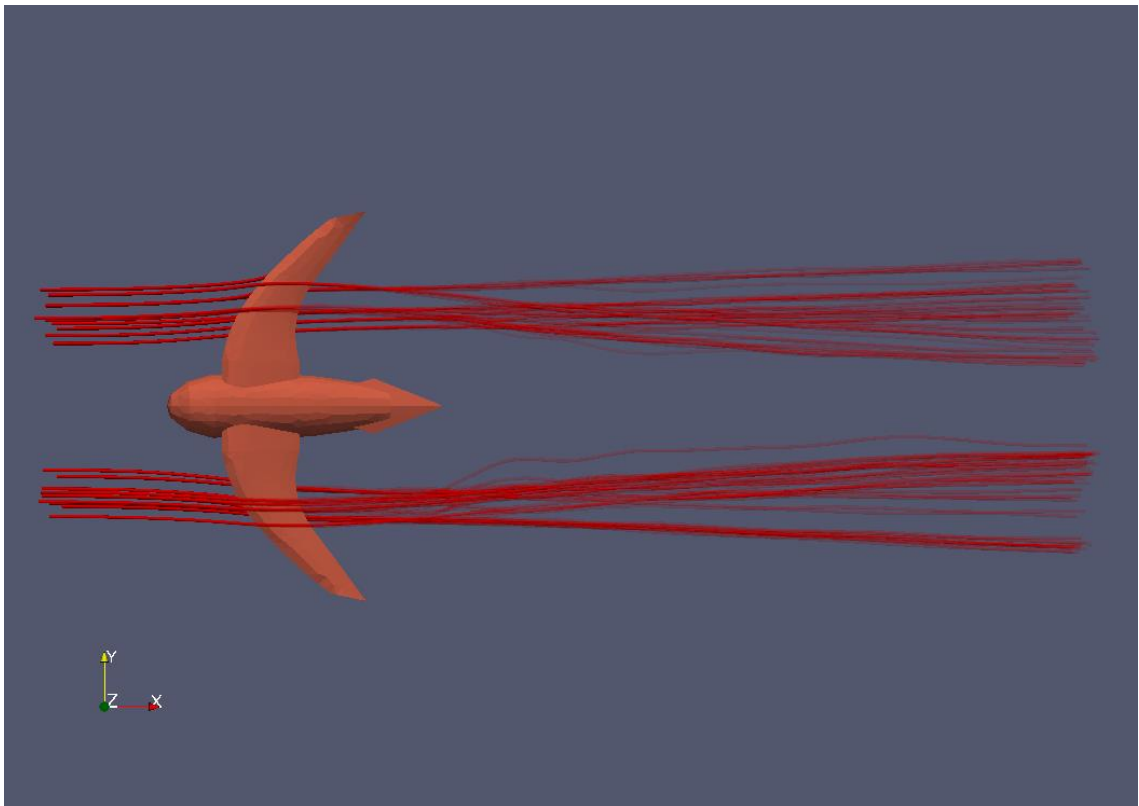


Fig. 3.26 流線の様子 $\alpha=20$, $\beta=0$, close

また、open の流線についてツバメの交流側からみた際の図を Fig. 3.27 に示す。この図では流れの微細な変化を追うため、1 枚目の画像から 0.02[s]ごとに透過処理し、合計 7 枚の画像を重ね合わせている。流線はツバメの上流から 2 箇所描いており、それぞれ流線 A、流線 B とする。更に、各画像について赤、桃、青、水、緑、黄、白の順で色付けをし、流線の移動が視覚的にわかる処理をしている。

Fig. 3.27 をみると、時間の経過に従って尾翼中心へ引き寄せられるような流れが確認できる。また、流れは渦を巻くように形成され、ツバメに向かって流線 A は左回り、流線 B は右回りの渦になっている。ツバメの上部にある流れを下部へ押さえつけるような渦により、剥離を抑制し、揚力と抗力を安定化させていると考えられる。

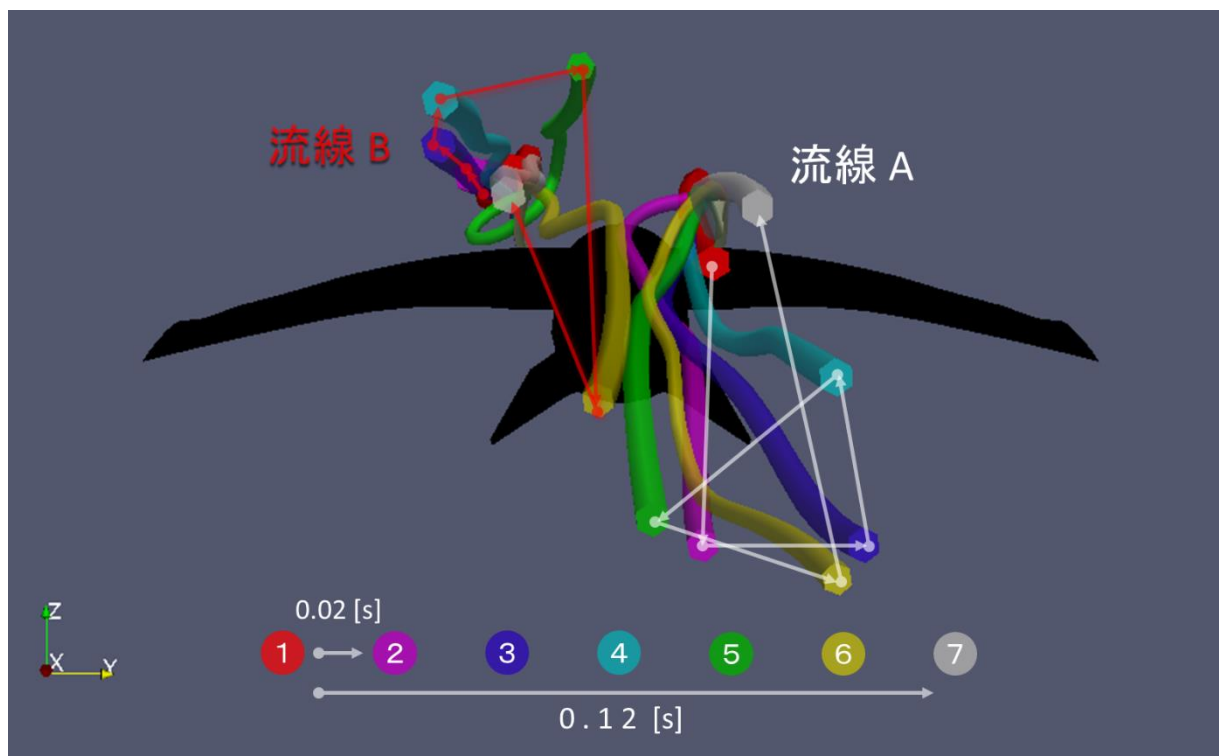


Fig. 3.27 流線の様子 $\alpha=20$, $\beta=0$, open (後流側からの視点)

3.4 非定常解析モデルの考察

本研究では 12 種の定常モデルの他に非定常計算も行った。初期姿勢を $\alpha = 0$, $\beta = 0$, open とし、尾翼を上下させるモデルを作成した。全解析時間は 3.0[s]とし、 $t = 1.0 \sim 1.5$ にかけて β を約 15[deg]へ増加、 $t = 1.5 \sim 2.0$ にかけて β を維持、 $t = 2.0 \sim 2.5$ にかけて β を 0[deg]へ減少させた。尾翼の動作速度は軌道計測実験で撮影した動画を参考にして決定した。なお、このモデルは尾翼動作に適したモデルに作りなおしているため、 $\alpha = 0$, $\beta = 0$, open と完全に同一なモデルではない。Fig. 3.28 に、このモデルの揚力、抗力、揚抗比の時間変化グラフを示す。

Fig. 3.28 をみると、流れが定常化して尾翼角度 β が一定に保たれている $t = 0.1 \sim 1.0$ の範囲では揚力、抗力ともにほぼ一定に保たれていることがわかる。

また、 $t = 1.0$ を過ぎて β が増加し始めると、揚力が増加している。この傾向は先述の定常解析の結果と一致している。しかし、抗力に関しては $t = 1.0$ [s]を過ぎても増加せず、 $t = 1.4$ を過ぎてから徐々に増加していくことがわかる。 $t = 1.0 \sim 1.3$ の範囲、即ち尾翼が曲がった直後の瞬間は、抗力が増加せずに揚力だけが増加しているため、揚抗比は約 0.55 増加している。基本的に揚抗比は高いほど飛行性能が優れているといえるため、尾翼を曲げた直後は飛行性能が大きく上昇していると言える。

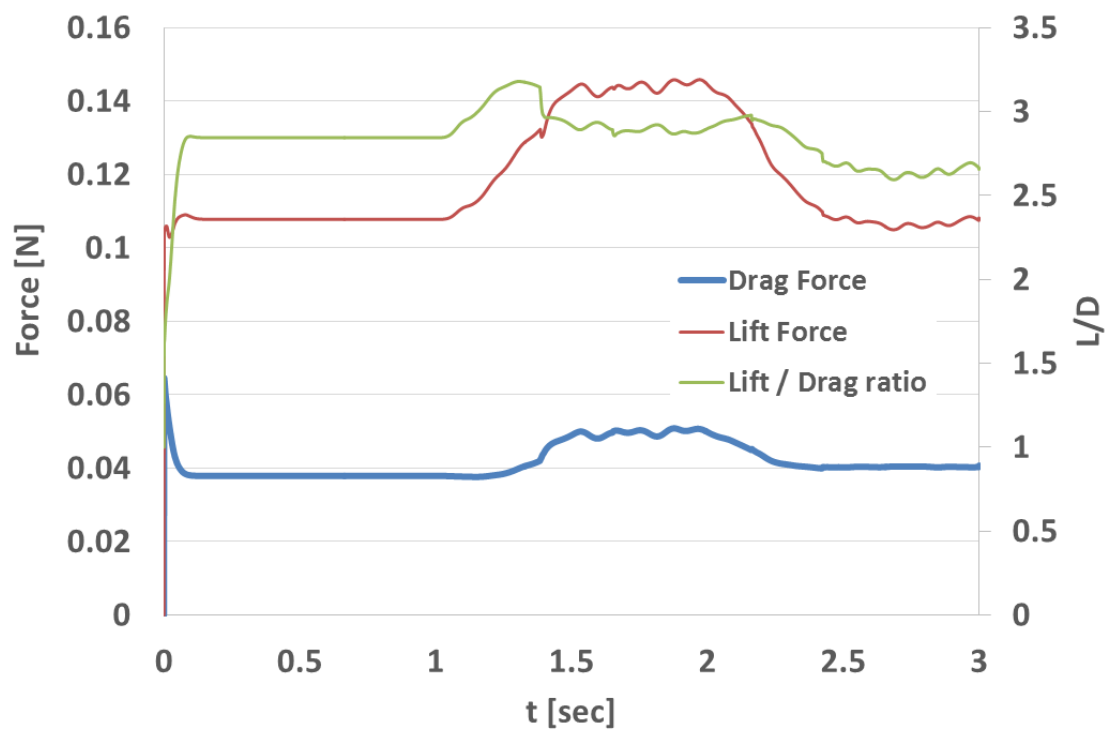


Fig. 3.28 非定常計算の揚力，抗力，揚抗比の時間変化グラフ

また揚力と抗力の変化を考察するため、1.0~1.4[s]における流線を視覚化した画像を Fig. 3.29 に示す。流線を描くための粒子は、ツバメの上流で z 軸に垂直な線上から等間隔で流した。

Fig. 3.29 で $t=1.0$ についてみると、ボディ上部の流れが前縁から後縁まで剥離せずに流れていることがわかる。その後の $t=1.2$ においても流線の大きな剥離は見られない。Fig. 3.28 のグラフにおいて $t=1.0\sim 1.2$ の範囲で揚抗比が増加していたのは、尾翼を曲げることで揚力を稼ぎつつ、瞬間的な動作により剥離も抑制して抗力の増加を抑制しているためだと考えられる。

$t=1.4$ についてみると、尾翼上部の流れがやや剥離し、後流が大きく乱れている様子がわかる。Fig. 3.28 のグラフで $t=1.4$ の前後で抗力が増加し始めたのは、尾翼上部の流れが剥離し、圧力抗力が増加したためだと考えられる。

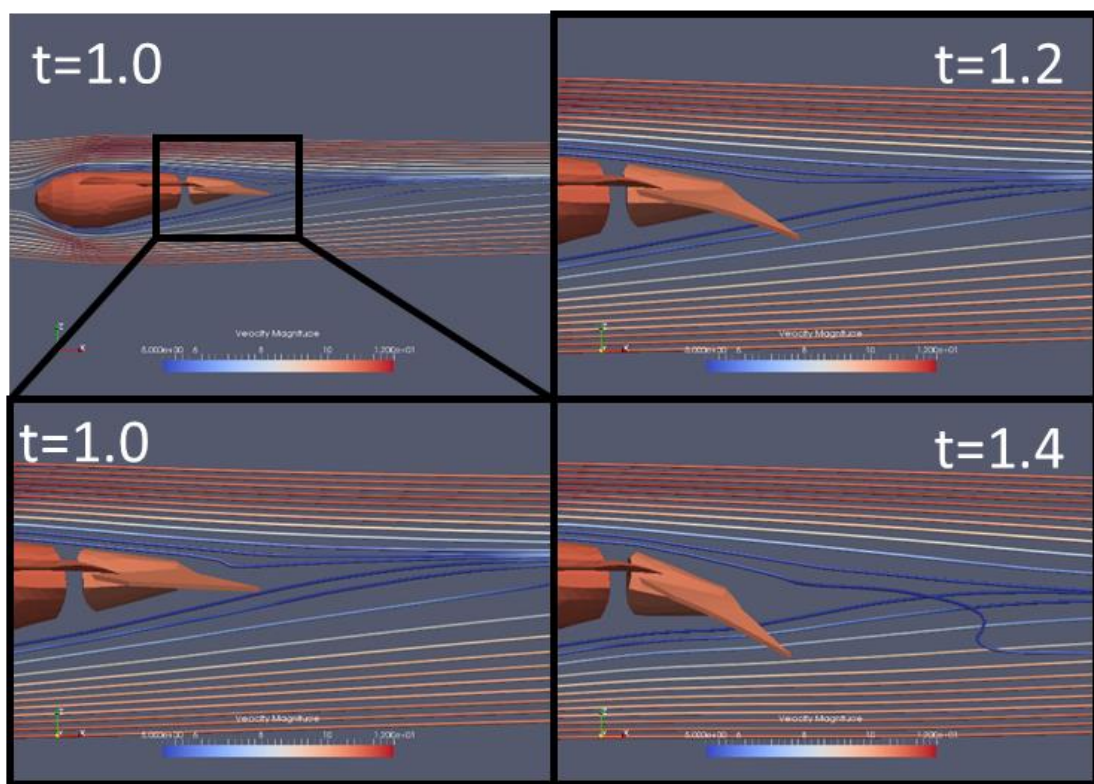


Fig. 3.29 非定常計算の流線と速度の様子 ($t=1.0\sim 1.4$)

3.5 メッシュサイズの妥当性について

この節では、各種モデルのメッシュサイズの妥当性について述べる。本研究ではメッシュサイズが解析結果に及ぼす影響を確かめるため、 $\alpha=20$, $\beta=20$, open のモデルについて異なるメッシュサイズをもつ 3 つのモデルを作成した。メッシュが荒いものから順に rough, mid, fine とし、抗力と揚力の時間グラフをそれぞれ Fig. 3.30a, Fig. 3.30b に示す。メッシュのサイズはツバメを取り囲む 6 つの面上の 1 つの要素の大きさとし、rough, mid, fine それぞれ 0.01[mm], 0.008[mm], 0.006[mm] に設定した。なお、本研究で述べてきた解析は全て mid 相当のメッシュを採用している。

流れが定常化した $t > 1$ [s] の範囲で議論する。rough は抗力、揚力ともに時間変化がほぼなく定常状態を維持している。rough よりメッシュが細かい mid では、わずかではあるが乱れが生じている。fine でもその傾向は変わらない。mid と fine で各種力の平均値は異なるものの、流れや力の微細な変化を追うには、mid, fine とともに解析に十分なメッシュサイズを有しているといえる。本研究では計算コストやクーラン数を考慮して、メッシュサイズは mid（壁面において 0.008[mm]）を採用した。

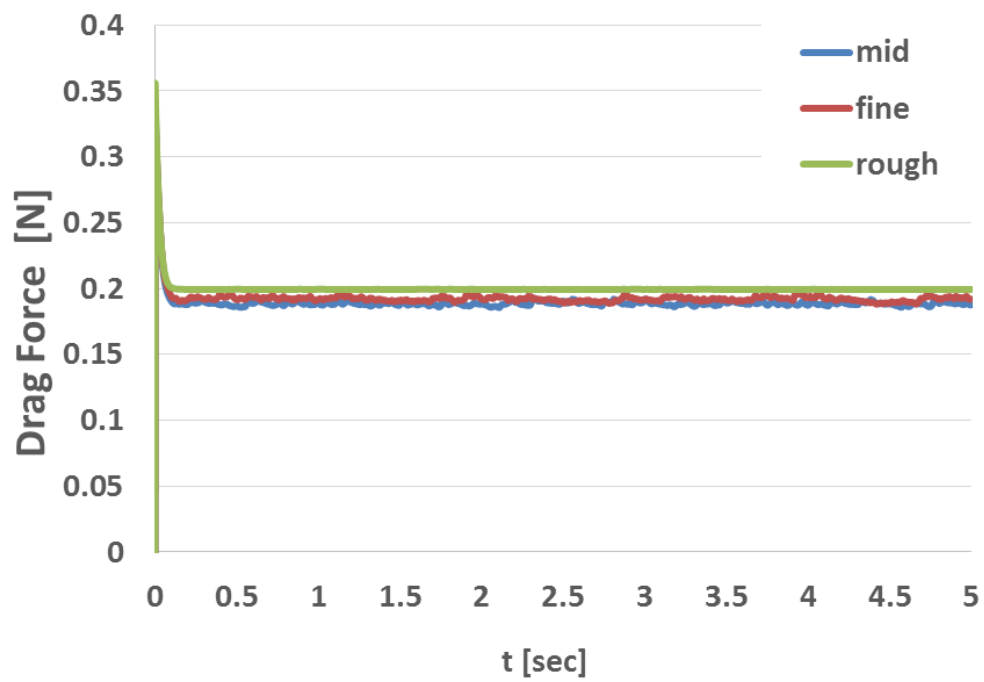


Fig. 3.30a 各メッシュサイズにおける抗力の時間変化グラフ

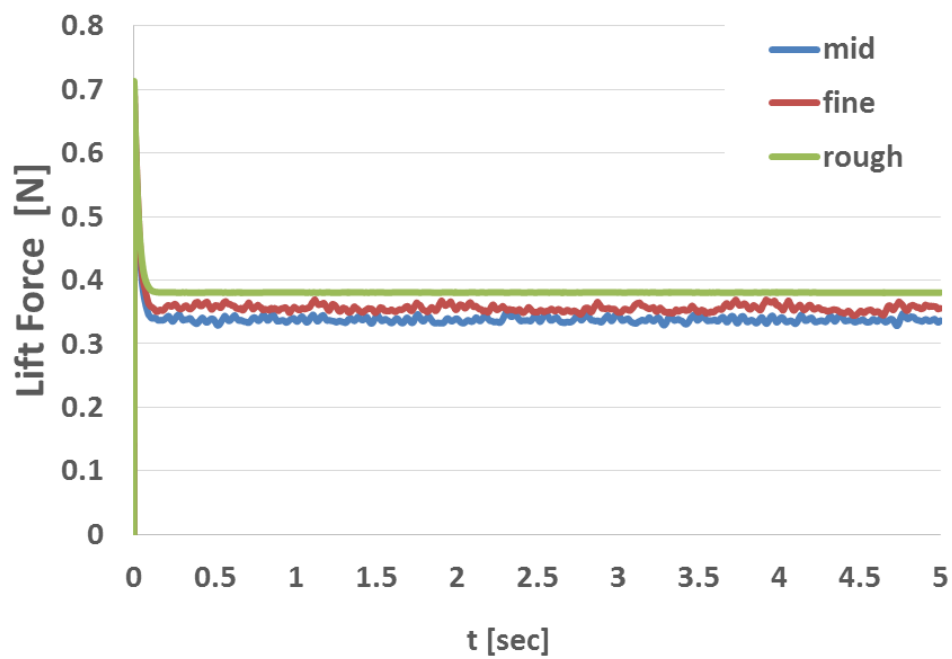


Fig. 3.30b 各メッシュサイズにおける揚力の時間変化グラフ

3.6 まとめ

- ・数種のモデルについて圧力分布，渦度分布，流線の様子を視覚化し，揚力と抗力の変化の原因を考察した．

- ・迎角 $\alpha=10$ での圧力分布についての考察で，close では尾翼後流で周期的な負圧が発生することがわかった．負圧の発生周期は揚力や抗力の乱れの周期と一致した．また open では周期的な変化は見られなかった．

- ・迎角 $\alpha=20$ での渦度分布についての考察で，open ではツバメ後流の渦度分布が尾翼の形状の影響を受けている可能性があることがわかった．時間が経過しても渦度分布の様子が大きく変化することはなかった．また close では，後流の渦度分布の様子が open と明確に異なり，時間経過による変動が大きいことがわかった．

- ・迎角 $\alpha=20$ での流線についての考察で，open はツバメ後流で尾翼中心へ向かう流れが確認できた．流線の様子を後流側から見た場合もその様子が確認できた．また close では，open と比較して尾翼中心へ向かう流れが小さいことがわかった．

- ・尾翼を上下に動作させる非定常計算の考察で，瞬間的な尾翼の折り曲げは抗力の増加を抑えつつ揚力を増加させるはたらきをもつ可能性が示唆された．

第4章 総論

ツバメの軌道計測実験では、これまで不明瞭であったツバメの姿勢と飛翔軌道の関係の解明に近づくことができた。ツバメが急激に上昇する際は、多くの場合に尾翼を広げ、腹部方向へ折り曲げることがわかった。また本研究では、3次元速度や姿勢といったデータを有する軌道解析に先駆けて取り組み、ツバメだけでなく、種々の飛翔体の研究にも応用できる軌道計測方法の確立に寄与できた。

これらの結果を参考にして行った流体解析では、尾翼の角度や展開の有無によって種々の差が生まれることが明らかになった。とりわけ、尾翼を広げた open と尾翼を閉じた closeの間では大きな差があり、揚力の安定性や揚抗比といった飛行特性はいずれも openの方が優れている結果となった。また open と close の違いをグラフや各種視覚化画像で表現し、後流や飛行特性について、尾翼という新たな視点から考察できた。

非定常計算では尾翼周りの過渡的な流れを追うことができた。流線の様子などから、瞬間的な尾翼動作は飛行特性を大きく増加させるはたらきをもつ可能性が示唆された。従来の研究の解析では主翼の羽ばたきに関するものが多いが、本研究では尾翼周りの流れの過渡的な変化を追い、ツバメの飛行特性に関して新たな知見をもたらした。

参考文献

- [1] 日本野鳥の会, 2012 年度版小雑誌 -消えゆくツバメ-, (2012)
- [2] ツバメの生態,
(http://www48.tok2.com/home/kochihara/tsubame/t_seitai.html)
- [3] P. Henningsson*, F. T. Muijres and A. Hedenstrom, Time-resolved vortex wake of a common swift flying over a range of flight speeds, Journal of The Royal Society, 10.1098-pp6, (2010)
- [4] wikipedia, アマツバメ垂目, <http://ja.wikipedia.org/wiki/アマツバメ垂目>
- [5] 國竹 泰夫ら, よくわかる航空力学の基本 -飛行機はなぜ飛ぶのか- 第 2 版, pp151-152, (2009)
- [6] BBC(British Broadcasting Corporation), Earthflight - Barn Swallows Drinking on the Wing, (2011)
- [7] Johan Bäckman* and Thomas Alerstam, Harmonic oscillatory orientation relative to the wind in nocturnal roosting flights of the swift *Apus apus*, The Journal of Experimental Biology 205, 905-910 (2002)
- [8] 中山直樹, 図解入門 よく分わかる最新飛行機の基本と仕組み, pp80-81, (2011)
- [9] 中山雄三, ひと目でわかる野鳥, pp158(2010)
- [10] 栗沢獏, 鳥の翼型の調査, B.A.R. Technical Report TR-7, BAK-DAN AircraftResearch
- [11] 日本野鳥の会, ツバメ全国調査 2013-2014,
(<http://tsubame.torimikke.net>)

謝辞

本研究を進めるにあたり，指導教官としてご指導下さった水沼博教授に心より感謝致します．また，多くのご助言を下さった小原弘道助教，小方聡准教授，長谷和徳准教授，下笠賢二先生，園村光弘さん，研究室の学生達に心より感謝致します．